

ФГБОУ ВПО «Воронежский государственный  
технический университет»

О.В. Поздышева

МЕТРОЛОГИЯ И СТАНДАРТИЗАЦИЯ  
В СПЦС

Утверждено Редакционно-издательским советом  
университета в качестве учебного пособия

Воронеж 2015

УДК 681.3

Поздышева О. В. Метрология и стандартизация в СПЦС: учеб. пособие [Электронный ресурс]. – Электрон. текстовые, граф. данные (1,49 Мб) / О. В. Поздышева. – Воронеж: ФГБОУ ВПО «Воронежский государственный технический университет», 2015. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). – Систем. требования: ПК 500 и выше; 256 Мб ОЗУ; Windows XP; Adobe Reader; 1024x768; CD-ROM; мышь. – Загл. с экрана.

Учебное пособие посвящено изучению основных понятий в области метрологии, способов обеспечения единства измерений и методов оценки их точности.

Издание соответствует требованиям Федерального государственного образовательного стандарта высшего профессионального образования по специальности 090302 «Информационная безопасность телекоммуникационных систем», дисциплине «Метрология и стандартизация в СПЦС».

Табл. 4. Ил. 25. Библиогр.: 16 назв.

Рецензенты: ОАО «Концерн «Созвездие»

(д-р техн. наук, ст. науч. сотрудник  
Н. М. Тихомиров);

д-р техн. наук, проф. А. Г. Остапенко

© Поздышева О. В., 2015

© Оформление ФГБОУ ВПО  
«Воронежский государственный  
технический университет», 2015

## ВВЕДЕНИЕ

Измерения играют важнейшую роль в жизни человека, поэтому потребность в них возникла в незапамятные времена. На сегодняшний день измерения проводятся на основе фундаментальных научных исследований путём установления требований, норм, правил, закреплённых законодательными и другими актами [1].

На протяжении всей истории развития науки и техники перед человеком возникает множество проблем, для решения которых необходимо располагать количественной информацией о том или ином свойстве объекта материального мира. Основным способом получения такой информации являются измерения, при правильном выполнении которых находится результат измерения с большей или меньшей точностью, отражающий интересующие свойства объекта измерения.

Первоначально метрология занималась описанием разного рода мер (линейных, вместимости, времени) и монет, применявшихся в разных странах, и соотношений между ними. Современная метрология опирается на физический эксперимент высокой точности, использует достижения физики, химии и др. естественных наук, но вместе с тем устанавливает свои специфические законы и правила, позволяющие находить количественное выражение свойств объектов. Общая теория измерений окончательно еще не сложилась, в нее входят сведения, полученные в результате анализа и изучения измерений и их элементов: физических величин, их единиц, средств и методов измерений, получаемых результатов измерений.

# 1. ПРЕДМЕТ МЕТРОЛОГИИ

История развития техники электрических измерений неразрывно связана с именами выдающихся российских ученых М. В. Ломоносова и Г. В. Рихмана, которые в 40-х годах XVIII в. сконструировали первый в мире электроизмерительный прибор, названный авторами «указатель электрической силы». Во второй половине XIX в. существенный вклад в развитие и совершенствование электроизмерительных приборов внесли выдающиеся русские ученые А. Г. Столетов, Б. С. Якоби и особенно М. О. Доливо-Добровольский, предложивший электромагнитные и ряд других приборов [1, 6].

Внедрение техники и методов измерений совпало с началом развития систем радиосвязи и радиотехники. Существенное внимание данным вопросам уделял крупнейший русский ученый, изобретатель радио А. С. Попов. Основателем отечественной измерительной техники считается академик М. В. Шулейкин, организовавший в 1913 г. первую заводскую лабораторию по производству измерительных приборов. Большой вклад в развитие техники измерений внес академик Л. И. Мандельштам, создавший в начале XX в. прототип современного электронного осциллографа. Многие русские ученые, такие, как М. А. Бонч-Бруевич, В. В. Ширков, Н. Н. Пономарев, В. Г. Дубенецкий и другие, существенно развили теорию и технику радиоизмерений.

*Метрология* – наука об измерениях, методах и средствах обеспечения их единства и способах достижения требуемой точности.

*Предметом метрологии* является извлечение количественно информации о свойствах объектов и процессов с заданной точностью и достоверностью.

*Средства метрологии* – совокупность средств измерений и метрологических стандартов, обеспечивающих их рациональное использование.

Метрология как наука об измерениях подразделяется на **теоретическую, законодательную и прикладную.**

*Теоретическая метрология* - раздел метрологии, предметом которого является разработка фундаментальных основ метрологии.

*Законодательная метрология* - раздел метрологии, предметом которого является установление обязательных технических и юридических требований по применению единиц физических величин, эталонов, методов и средств измерений, направленных на обеспечение единства и необходимой точности измерений в интересах общества.

*Прикладная метрология* - раздел метрологии, предметом которого являются вопросы практического применения разработок теоретической метрологии и положений законодательной метрологии.

## **1.1. Физические величины**

В измерениях для количественного описания различных свойств, процессов и физических тел вводят понятие величины [3, 9].

**Физическая величина** — свойство, общее в качественном отношении для множества объектов, физических систем, их состояний и происходящих в них процессов, но индивидуальное в количественном отношении для каждого из них.

Качественная сторона понятия «физическая величина» определяет ее «род» (например, электрическое сопротивление как общее свойство проводников электричества), а количественная — ее «размер» (сопротивление конкретного исследуемого проводника). Числовое значение результата измерения зависит от выбора единицы физической величины.

Физические величины делят на **измеряемые** и **оцениваемые**.

*Измеряемые физические величины* можно выразить количественно определенным числом установленных единиц измерения.

Для *оцениваемых физических величин* по каким-либо причинам нельзя ввести единицу измерения, и их можно лишь оценить.

*Размерность физической величины* — качественная определенность величины, присущая конкретному предмету, системе, явлению или процессу.

*Размер физической величины* — количественная определенность величины, присущая конкретному предмету, системе, явлению или процессу.

*Оценивание* — операция приписывания данной физической величине определенного числа принятых для нее единиц, проведенная по установленным правилам.

По *наличию размерности* физические величины делятся на *размерные* и *безразмерные*.

*Значение физической величины* — оценка размера физической величины в виде некоторого числа принятых для нее единиц измерения. *Числовое значение физической величины* — отвлеченное число, выражающее отношение значения величины к соответствующей единице данной физической величины (например, 10 А — значение силы тока, причем само число 10 — это и есть числовое значение). Именно термин «значение» следует применять для выражения количественной стороны рассматриваемого свойства. Неправильно, например, говорить и писать «величина тока», «величина напряжения» и т. д., поскольку ток и напряжение сами являются величинами (правильным будет применение терминов «значение силы тока», «значение напряжения» и пр.).

Для обозначения частных особенностей физических величин применяют термин *параметр*. Например, конденсатор характеризуют емкостью, а его параметрами можно считать тангенс угла потерь. Иногда параметром называют измеряемую физическую величину - амплитуду, фазу, частоту.

При выбранной оценке физической величины ее можно охарактеризовать **истинным, действительным и измеренным** значениями. Нахождение истинного значения физической величины — главная проблема метрологии.

*Истинным значением физической величины* называется значение физической величины, которое идеальным образом отражало бы в качественном и количественном отношении соответствующее свойство объекта. Определить экспериментально его невозможно вследствие неизбежных погрешностей измерения.

*Погрешность измерения  $\Delta$*  - есть разница между результатом измерения  $x$  и действительным значением этой величины, под которым подразумевается ее значение, найденное экспериментально и настолько приближающееся к истинному  $x_i$ , что для данной цели оно может быть использовано вместо него.

В связи с тем, что истинное значение физической величины определить невозможно, в практике измерений оперируют понятием действительного значения, степень приближения которого к первому зависит от точности измерительного средства и погрешности самих измерений.

Действительным значением физической величины называется значение физической величины, найденное экспериментальным путем и настолько приближающееся к истинному значению, что для данной цели может быть использовано вместо него. Для действительного значения физической величины всегда можно указать границы более или менее узкой зоны, в пределах которой с заданной вероятностью находится истинное значение физической величины. Действительное значение физической величины определяют по образцовым мерам и приборам, погрешностями которых можно пренебречь по сравнению с погрешностями применяемых рабочих средств измерения.

Под *измеренным значением* понимается значение величины, отсчитанное по отсчетному устройству средства измерения.

Важную роль в процессе измерения играют *условия измерения* — совокупность влияющих величин, описывающих состояние окружающей среды и средства измерений.

Различают нормальные, рабочие и предельные условия измерений.

*Нормальные условия измерений* — условия, при которых влияющие величины имеют нормальные или находящиеся в пределах нормальной области значения. *Нормальная область значений влияющей величины* — область значений, в пределах которой изменением результата измерений под воздействием влияющей величины можно пренебречь в соответствии с установленными нормами точности.

*Рабочими* называются условия измерений, при которых влияющие величины находятся в пределах своих рабочих областей. *Рабочая область значений влияющей величины* — область, в пределах которой нормируется дополнительная погрешность или изменение показаний средства измерения.

*Предельные условия измерений* характеризуются экстремальными значениями измеряемой и влияющих величин, которые средство измерения может выдержать без разрушений и ухудшения его метрологических характеристик.

*Физический параметр* - физическая величина, характеризующая частную особенность измеряемой величины. Например, при измерении напряжения переменного тока параметром могут быть его амплитуда, мгновенное, средневыпрямленное или среднее квадратическое значения и пр.

*Единица физической величины* — физическая величина фиксированного размера, которой по определению условно присвоено стандартное числовое значение, равное единице. Она применяется для количественного выражения однородных физических величин.

*По виду измеряемой величины* различают следующие измерения:

- механические, охватывающие измерения массы, силы, скорости (линейной и угловой), частоты вращения, ускорения,



момента вращения, давления, механического напряжения, расхода протекающего вещества, уровня раздела сред и т.д.;

- тепловые, включающие измерения температуры, её градиентов, тепловых потоков и т.д.;

- линейно-угловые, включающие измерения линейных размеров, углов, дуг и т.д.;

- электрические, охватывающие измерения силы тока, напряжения, мощности, энергии, сдвига фаз, сопротивления и т. п.; разновидностью электрических являются радиотехнические измерения, относящиеся к области высоких частот;

- виброакустические, включающие в себя измерения уровней виброускорений и воздушного шума;

- физико-химические измерения состава и свойств веществ и смесей веществ; сюда относятся определение содержания газов в смесях, анализ жидких растворов, содержание влаги в газах и жидкостях и т. п.

В данную классификацию не вошли многие другие измерения, редко встречающиеся на практике.

В сущности, всякое измерение есть процедура сравнения какого-либо свойства, характеризующего рассматриваемый объект, с некоторой единицей этого свойства, при помощи технического средства, хранящего единицу.

## **1.2. Международная система единиц**

Единица измерения должна быть установлена для каждой из известных физических величин, при этом необходимо учитывать, что многие физические величины связаны между собой определенными зависимостями. Поэтому только часть физических величин и соответственно их единиц могут определяться независимо от других. Такие величины называют *основными*. Остальные физические величины определяются с использованием физических законов и зависимостей через основные физические величины.

Совокупность основных и производных единиц физических величин, образованная в соответствии с принятыми принципами, называется *системой единиц физических величин*. Единица основной физической величины является *основной единицей* данной системы

Международная система единиц СИ (SI — от франц. — *Système International* — The International System of Units; в русской транскрипции система СИ) была принята XI Генеральной конференцией по мерам и весам (ГКМВ) в 1960 г. и уточнена на последующих ГКМВ. На территории нашей страны система единиц СИ установлена ГОСТ 8 417-2002. Единицы величин.

Основные единицы выбирают так, чтобы, пользуясь закономерной связью между величинами можно было бы образовать единицы других величин. Образованные таким образом величины и единицы называют *производными*.

Основные единицы СИ с указанием сокращенных обозначений русскими и латинскими буквами приведены в табл. 1.1.

Таблица 1.1

Основные единицы СИ

Величина		Единица		
Наименование	Размерность	Наименование	Обозначение	
			международное	русское
Длина	$L$	метр	m	м
Масса	$M$	килограмм	kg	кг
Время	$T$	секунда	s	с
Сила электрического тока	$I$	ампер	A	А
Термодинамическая	$\theta$	кельвин	K	К
Количество вещества	$S$	моль	mol	моль
Сила света	$J$	кандела	cd	кд

Ряд производных единиц СИ, имеющие специальные наименования и обозначения, приведен в табл. 1.2.

Таблица 1.2

Производные единицы СИ, имеющие специальные наименования и обозначения

Величина	Единица		
	Наименование	Обозначение	
		международное	русское
Плоский угол	радиан	rad	рад
Телесный угол	стерадиан	sr	ср
Частота	герц	Hz	Гц
Сила	ньютон	N	Н
Давление	паскаль	Pa	Па
Энергия, работа, количество теплоты	джоуль	J	Дж
Мощность	ватт	W	Вт
Электрический заряд, количество электричества	кулон	C	Кл
Электрическое напряжение, электрический потенциал, разность потенциалов, электродвижущая сила	вольт	V	В
Электрическая емкость	фарад	F	Ф
Электрическое сопротивление	ом	$\Omega$	Ом
Электрическая проводимость	сименс	S	См
Поток магнитной индукции, магнитный поток	вебер	Wb	Вб
Плотность магнитного потока, магнитная индукция	тесла	T	Тл
Индуктивность, взаимная индукция	генри	H	Гн
Температура Цельсия	градус Цельсия	$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$
Световой поток	люмен	lm	лм
Освещенность	люкс	lx	лк
Активность радионуклида	беккерель	Bq	Бк

Единицы количества информации, используемые при передаче, обработке и хранении результатов измерений величин – бит и байт.

*Внесистемные единицы* — единицы физических величин, не входящие ни в одну из систем единиц. Подобные единицы выбирались в отдельных областях измерений вне связи с построением систем единиц. Внесистемные единицы можно разделить на независимые (определяемые без помощи других единиц) и произвольно выбранные, но определяемые через другие единицы. К первым относится, например, градус Цельсия, определяемый как 0,01 разности между температурами кипения воды и таяния льда при нормальном атмосферном давлении, полный угол (оборот) и др. Ко вторым относятся, например, единица мощности — лошадиная сила (735,499 Вт), единицы давления — техническая атмосфера (1 кгс/см<sup>2</sup>), миллиметр ртутного столба (133,322 н/м<sup>2</sup>), бар (10<sup>5</sup> н/м<sup>2</sup>) и др.

*Примечание.* Кроме термодинамической температуры допускается применять температуру Цельсия (это специальное наименование, обозначение  $t$ ), определяемую как  $t = T - T_0$ , где  $T_0 = 273,15$  К. По размеру градус Цельсия равен Кельвину.

В принципе применение внесистемных единиц нежелательно, так как неизбежные пересчеты требуют затрат времени и увеличивают вероятность ошибок. Среди получивших широкое распространение внесистемных единиц отметим киловатт-час, ампер-час.

Сокращенные обозначения различных единиц, как международных, так и русских, названных в честь великих ученых, пишутся с заглавных букв, например: ампер – А; ом – Ом; вольт – В; фарад – Ф (отметим, что часто используется не регламентируемый термин фарада). В тоже время для сравнения: метр – м, секунда – с, килограмм – кг.

В публикациях допускается применять либо международные, либо русские обозначения единиц. Одновременное применение обозначений обоих видов в одном и том же издании не допускается, за исключением публикаций по единицам величин.

Так как диапазон реальных значений физических величин очень велик, то применение целых единиц СИ иногда неудобно, поскольку в результате измерений получаются большие или малые их значения.

Поэтому в системе СИ были установлены десятичные кратные и дольные единицы этой системы, которые образуются с помощью множителей.

Кратные и дольные единицы физических величин пишутся слитно с наименованием единицы СИ, например: милливольт (мВ), мегагерц (МГц), наносекунда (нс), пикофарад (пФ). Наименования и обозначения десятичных кратных и дольных единиц СИ образуют с помощью множителей и приставок, указанных в табл. 1.3.

Таблица 1.3

Множители и приставки, используемые для образования наименований и обозначений десятичных кратных и дольных единиц СИ

Десятичный	Приставка	Обозначение приставки	
		международное	русское
$10^{16}$	экса	E	Э
$10^{15}$	пета	P	П
$10^{12}$	тера	T	Т
$10^9$	гига	G	Г
$10^6$	мега	M	М
$10^3$	кило	k	к
$10^2$	гекто	h	г
$10^1$	дека	da	да
$10^{-1}$	деци	d	д
$10^{-2}$	санتي	c	с
$10^{-3}$	милли	m	м
$10^{-6}$	микро	$\mu$	мк
$10^{-9}$	нано	n	н
$10^{-12}$	пико	p	п
$10^{-15}$	фемто	f	ф
$10^{-16}$	атто	a	а

### 1.3. Измерения и средства измерений. Основное уравнение метрологии

*Измерением* называется процесс нахождения значения физической величины опытным путем с помощью специальных технических средств [1].

Метрологическая суть измерения сводится к *основному уравнению измерения (основному уравнению метрологии)*:

$$A = kA_0, \quad (1.1)$$

где  $A$  — значение измеряемой физической величины;  $A_0$  — значение величины, принятой за образец;  $k$  — отношение измеряемой величины к образцу.

Любое измерение заключается в сравнении путем физического эксперимента данной величины с некоторым ее значением, принятым за единицу сравнения, с так называемой *мерой*.

Наиболее удобен вид основного уравнения метрологии (1.1), если выбранная за образец величина равна единице. При этом параметр  $k$  представляет собой числовое значение измеренной величины, зависящее от принятого метода измерения и единицы измерения

Получаемая при измерениях физических величин информация называется *измерительной*. Зачастую информация об объекте измерения известна до проведения исследований, что является важнейшим фактором, обуславливающим эффективность измерения. Такую информацию об объекте измерения называют *априорной информацией*. При полном отсутствии этой информации измерение в принципе невозможно, так как неизвестно, что же необходимо измерить, а следовательно, нельзя выбрать нужные средства измерений. При наличии априорной информации об объекте в полном объеме, т. е. при известном значении измеряемой величины, измерения попросту не нужны. Априорная информация определяет достижимую точность измерений и их эффективность.

Информация, получаемая в результате измерения, может содержаться в объекте измерения в двух формах: пассивной и активной. *Пассивная информация* — это совокупность сведений, заключенных в том, как устроен объект; такой информацией является, например, информация о величине напряжения источника питания. С другой стороны, информация является *активной*, если она имеет форму энергетической характеристики какого-либо явления. Подобные энергетические явления называются сигналами. Их примерами являются электрические, оптические и акустические сигналы, используемые для передачи информации.

#### 1.4. Основные характеристики измерений

Состояние средств измерения определяет стабильность работы предприятия и качество выпускаемой продукции.

*Результат измерения* – значение величины, найденное путем ее измерения (ГОСТ 16263).

*Единство измерений* – состояние измерений, при котором их результаты выражены в узаконенных единицах и погрешности измерений известны с заданной вероятностью (ГОСТ 16263).

*Погрешность измерения* – отклонение результата измерения от истинного значения измеряемой величины.

*Погрешность средства измерения* — разность между показаниями средства измерения и истинным (действительным) значением измеряемой физической величины.

*Точность измерений* — понятие, отражающее меру близости результатов измерений к истинному значению измеряемой физической величины. Термин «точность измерений», т. е. степень приближения результатов измерения к некоторому действительному значению, не имеет строгого определения и используется для качественного сравнения измерительных операций. Точность и погрешность связаны

обратной зависимостью. По точности измерения делят на три основные группы:

- *измерения максимальной возможной точности*, достижимой при существующем уровне развития науки и техники; это измерения, связанные с созданием и эксплуатацией эталонов, а также измерения, проводимые при научных исследованиях; для таких измерений необходима тщательная оценка погрешностей и анализ их источников;

- *контрольно-поверочные и лабораторные измерения*, к которым, в частности, относятся метрологическая аттестация средств измерений, лабораторный анализ, экспертные измерения; погрешность таких измерений не должна превышать некоторого определенного уровня;

- *технические измерения*, при которых погрешность оценивают по метрологическим характеристикам средств измерений с учетом применяемого метода измерений.

*Правильность измерений* — это метрологическая характеристика, отражающая близость к нулю систематических погрешностей результатов измерений.

*Сходимость результатов измерений* характеризует качество измерений, отражающее близость друг к другу результатов измерений одной и той же величины, выполняемых повторно одними и теми же методами и средствами измерений и в одних и тех же условиях.

*Воспроизводимость результатов измерений* — характеристика качества измерений физической величины, отражающая близость друг к другу результатов измерений одной и той же величины, полученных в разных местах, разными методами и средствами измерений, разными операторами, но приведенных к одним и тем же условиям.

*Достоверность измерений* определяется степенью *доверия* к результату измерения и характеризуется вероятностью того, что истинное значение измеряемой величины находится в указанных пределах, или в указанном интервале. Данный интервал в теории измерений называют



*доверительным* и между его границами с заданной *доверительной вероятностью*

$$P_d(x_n < x_i < x_b) = 1 - q, \quad (1.2)$$

находится истинное значение  $x_i$  оцениваемого параметра. В формуле (1.2)  $q$  — *уровень значимости критерия ошибки* (или *уровень значимости ошибки*);  $x_n, x_b$  — нижняя и верхняя границы доверительного интервала.

Обычно измерения делят на *достоверные* и *недостоверные* в зависимости от того известны или неизвестны вероятностные характеристики их отклонения от истинных значений измеряемых величин.

*Принцип измерений* — совокупность физических явлений, на которых основаны измерения. Например, применение эффекта Холла для измерения мощности, эффекта Джозефсона для измерения электрического напряжения.

*Метод измерений* — совокупность приемов использования принципов и средств измерений. Это достаточно общее определение на практике часто конкретизируют, относя его только к применяемым средствам измерения, например метод измерения частоты частотомером, напряжения — вольтметром, силы тока — амперметром и т. д.

*Методика измерения* — общий или поэтапный план проведения измерения — намеченный распорядок измерений, определяющий состав применяемых приборов, последовательность и правила проведения операций.

*Объект измерения* — это реальный физический объект, свойства которого характеризуются одной или несколькими измеряемыми физическими величинами.

*Математическая модель объекта* — совокупность математических символов (образов) и отношений между ними, которая адекватно описывает свойства объекта измерения.

*Алгоритм измерения* — точное предписание о порядке выполнения операций, обеспечивающих измерение физической величины.

## 1.5. Шкалы измерений

**Шкала физической величины** – упорядоченная совокупность значений физической величины, служащая исходной основой для измерения данной величины. Среди шкал следует выделить три основных типа: шкалы наименований, интервалов и абсолютные шкалы.

1. *Шкала наименований (шкала классификации)* основана на приписывании объекту цифр (знаков), играющих роль простых имен. Нумерация объектов по шкале наименований осуществляется по принципу: «не приписывай одну и ту же цифру разным объектам». Поэтому с цифрами, используемыми только как специфические имена, нельзя проводить никаких арифметических действий.

2. *Шкала интервалов (шкала разностей)* отражает разность значений физической величины. К таким шкалам относятся, например, температурные шкалы Цельсия, Фаренгейта и Реомюра. На температурной шкале Цельсия за начало отсчета разности температур принята температура таяния льда. Для удобства пользования шкалой Цельсия интервал между температурами таяния льда и кипения воды разделен на 100 равных интервалов — градусов.

3. *Абсолютные шкалы* имеют естественное однозначное определение единицы измерения и не зависят от принятой системы единиц измерения. Данные шкалы соответствуют относительным величинам: коэффициенту усиления, коэффициенту ослабления и т. д.

### 1.5.1. Типы отсчетных устройств

1. Шкала (аналоговый отсчет) и стрелка (указатель) (рис. 1.1).

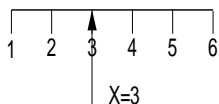


Рис. 1.1. Шкала и стрелка (указатель)

2. Шкала (аналоговый отсчет) и световой луч (указатель) (рис. 1.2).

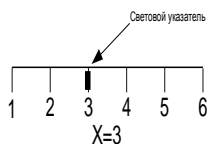


Рис. 1.2. Шкала и световой луч (указатель)

*Примечание.* Приборы со стрелочным указателем менее чувствительны, чем приборы со световым указателем.

3. Отсчетные устройства в виде цифрового дисплея. Представляют собой специальные индикаторные устройства (рис. 1.3), в котором под действием электрической величины возникает определенный визуальный эффект.



Рис. 1.3. Индикаторные устройства

#### 4. Аналого-дискретный отсчет (рис. 1.4).

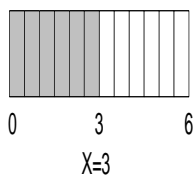


Рис. 1.4. Аналого-дискретный отсчет

#### 5. Комбинированный отсчет (рис. 1.5)

6.



Рис. 1.5. Комбинированный отсчет

### 1.6. Классификация измерений

Измерения весьма разнообразны, что объясняется множеством измеряемых величин, различным характером их изменения во времени, различными требованиями к точности измерений и т. д. В связи с этим измерения классифицируют по различным признакам.

#### Виды измерений

Виды измерений отделяются физическим характером измеряемой величины, требуемой точностью измерения, необходимой скоростью измерения, условиями и режимом измерений и пр. На рис. 1.6 представлена достаточно обобщенная классификация, из которой следует, что

существует множество видов измерений, и число их может увеличиваться [11].



Рис. 1.6. Классификация видов измерений

Наибольшее распространение получила *классификация по общим приемам получения результатов измерений*. Согласно этому признаку, измерения делятся на прямые, косвенные, совместные и совокупные.

*Прямым* называется измерение, когда искомое значение физической величины находится непосредственно из опытных данных. Следует отметить, что часто под прямыми понимаются такие измерения, при которых не производится промежуточных преобразований. Это, например, измерение напряжения и силы тока известными электроизмерительными приборами — вольтметрами и амперметрами. Математически прямые измерения можно охарактеризовать элементарной формулой:

$$A = x,$$

где  $x$  — значение величины, найденное путем ее измерения и называемое *результатом измерения*.

*Косвенным* называется измерение, при котором искомое значение величины находят на основании известной зависимости между этой величиной и величинами, подвергаемыми прямым измерениям. Косвенные измерения можно охарактеризовать следующей формулой:

$$A=f(x_1,x_2,\dots,x_m), \quad (1.3)$$

где  $x_1, x_2, x_m$  — результаты прямых измерений величин, связанных функциональной зависимостью  $f$  с искомым значением измеряемой величины  $A$ .

Косвенные измерения характерны для практики радиоизмерений, например, измерение мощности методом амперметра-вольтметра, определение резонансной частоты колебательного контура по результатам прямых измерений емкости и индуктивности контура и т. д.

К косвенным относятся те измерения, при которых расчет осуществляют вручную или автоматически, но после получения результатов прямых измерений. При этом может быть учтена отдельно погрешность расчета значений.

По виду функциональной зависимости косвенные измерения делят на линейные и нелинейные. Для *линейных косвенных измерений* математический аппарат статистической обработки полученных результатов разработан детально. *Нелинейные косвенные измерения* отличаются тем, что результаты измерений аргументов подвергаются функциональным преобразованиям.

*Совокупными* называются проводимые одновременно измерения нескольких одноименных величин, при которых их значения находят решением системы уравнений, получаемых при прямых или косвенных измерениях различных сочетаний этих величин.

Значение физической величины может быть найдено посредством однократного её измерения, или путём нескольких, следующих друг за другом измерений с последующей статистической обработкой их результатов. В первом случае измерения называют однократными или простыми, во втором – измерениями с многократными наблюдениями или статистическими;

*Совместными* называют проводимые одновременно измерения двух или нескольких неоднородных величин для установления зависимости между ними. Заметим, что совокупные и совместные измерения весьма близки друг к другу.

Наиболее известный пример *совместных измерений* — определение зависимости сопротивления резистора от температуры:

$$R_t = R_{20} [1 + \alpha(t - 20) + \beta(t - 20)^2], \quad (1.4)$$

где  $R_{20}$  — сопротивление резистора при  $t = 20^\circ\text{C}$ ;  $\alpha$ ,  $\beta$  — температурные коэффициенты.

Косвенные, совместные и совокупные измерения объединены общим свойством: их результаты рассчитывают по известным функциональным зависимостям между измеряемыми величинами и величинами, определяемыми прямыми измерениями. Различие между этими измерениями заключается лишь в виде функциональной зависимости, используемой при расчетах. При косвенных измерениях эта зависимость выражается одним уравнением в явном виде (1.3), при совместных и совокупных — системой неявных уравнений типа (1.4).

Вместе с тем, как следует из приведенных определений, *совместные измерения основываются на известных уравнениях, отражающих существующие связи между измеряемыми величинами, а совокупные — на уравнениях, отражающих произвольное комбинирование величин.*

Следовательно, *совместные измерения можно интерпретировать как обобщение косвенных, а совокупные — как обобщение прямых измерений*. Поэтому далее отражены прямые и косвенные измерения.

По характеру изменения измеряемой величины во времени различают статический и динамический режимы измерений.

*Статический режим измерений* — это режим измерений, при котором средство измерений работает в статическом режиме, т. е. когда выходной сигнал остается неизменным в течение времени его использования (или меняется так медленно, что каждый результат измерения может быть выражен только одним числом).

*Динамический режим измерений* — это режим измерений, результатом которого является функциональная зависимость измеряемой величины от времени, т. е. когда выходной сигнал средства изменяется во времени, в соответствии с изменением по времени измеряемой величины. Таким образом, динамические измерения применяют для измерения параметров величин, имеющих зависимость от времени. Пример динамического измерения — определение мгновенных значений радиотехнических сигналов в течение какого-либо интервала времени. Динамические измерения могут быть непрерывными (применяемые технические средства позволяют непрерывно следить за значениями измеряемой величины) и дискретными (значения измеряемой величины фиксируются только в отдельные моменты времени). Для оценки точности результатов динамических измерений необходимо знание динамических свойств средств измерений.

Необходимо также различать измерения параметров *детерминированных величин* (сигналов) и *характеристик случайных величин* (сигналов, процессов). В первом случае измеряются заведомо постоянные, либо меняющиеся по известному закону величины. Во втором — в результате некоторого числа опытов определяются характеристики



законов распределения измеряемых случайных величин (амплитуды, длительности импульсов и т. д.).

В зависимости от метода измерения и свойств применяемых средств измерений, все рассмотренные выше виды измерений могут выполняться либо с *однократными*, либо с *многократными* наблюдениями.

*Наблюдением* при измерении (измерительным наблюдением) называется единичная экспериментальная операция, итог которой — *результат наблюдения* — всегда имеет случайный характер и представляет собой одно из значений измеряемой величины, подлежащей совместной обработке для получения результата измерения. От числа наблюдений измеряемой величины зависит способ обработки экспериментальных данных и оценки погрешностей измерений.

На практике многократные наблюдения при прямых измерениях какой-то физической величины осуществляются одним экспериментатором, в одинаковых условиях и с помощью одного и того же средства измерения. Такие измерения принято называть *равноточными*. При равноточных измерениях средние квадратические отклонения (СКО) результатов всего ряда измерений могут быть близки и даже равны между собой.

Однако часто необходимо определить наиболее точную оценку измеряемой величины на основании результатов наблюдений, полученных разными экспериментаторами, в разных условиях, с применением разных методов и средств измерения. Результаты таких наблюдений будут иметь различную точность, и поэтому такие измерения называют *неравноточными*.

По необходимой точности оценки погрешности измерения делятся на следующие виды: высшей точности (*прецизионные*), связанные с созданием эталонов и измерением фундаментальных физических констант; технические измерения, в которых погрешность результата определяется характеристиками средств измерений, регламентированными

условиями измерений, и оценивается до проведения измерения; контрольно-поверочные, погрешность которых не должна превышать некоторых заранее заданных значений.

## 1.7. Основные методы измерений

Конкретные методы измерений определяются видом измеряемых величин, их размерами, требуемой точностью результата, быстротой процесса измерения, условиями, при которых проводятся измерения, и рядом других признаков. В принципе каждую физическую величину можно измерить несколькими методами, которые могут отличаться друг от друга особенностями как технического, так и методического характера. В отношении технических особенностей можно сказать, что существует множество методов измерения, и по мере развития науки и техники, число их все увеличивается. С методической стороны все методы измерений поддаются систематизации и обобщению по общим характерным признакам [1, 3].

Современные методы измерений принято делить на метод непосредственной оценки и метод сравнения (рис. 1.7).

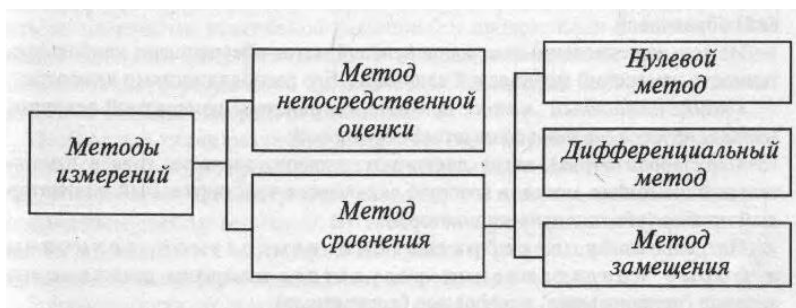


Рис. 1.7. Классификация методов измерения

При *методе непосредственной оценки* численное значение измеряемой величины определяют непосредственно по показанию измерительного прибора (например, измерение напряжения с помощью вольтметра). Быстрота процесса

измерения методом непосредственной оценки делает его часто незаменимым для практического использования, хотя точность измерения обычно ограничена.

*Метод сравнения* — метод измерений, при котором измеряемую величину сравнивают с величиной, воспроизводимой мерой. Это может быть, например, измерение уровня напряжения постоянного тока путем сравнения с ЭДС нормального (эталонного) элемента. Приборы, реализующие измерение на основе метода сравнения, называют измерительными приборами сравнения. В отличие от приборов непосредственной оценки, более удобных для получения оперативной информации, приборы сравнения обеспечивают большую точность измерений. Метод сравнения применяют как для измерения величин, содержащих запас энергии (напряжение, ток или мощность), так и для измерения параметров элементов электрических цепей: сопротивлений, индуктивностей и емкостей.

Различают следующие разновидности метода сравнения:

- *нулевой метод*, при котором действие измеряемой величины полностью уравнивается образцовой;
- *дифференциальный метод*, когда измеряется разница между измеряемой величиной и близкой ей по значению известной эталонной (например, измерение электрического сопротивления методом неуравновешенного моста), дифференциальный метод сравнения используют тогда, когда практическое значение имеет отклонение измеряемой величины от некоторого номинального значения (уход частоты, отклонение напряжения и т.д.);
- *метод замещения*, при котором действие измеряемой величины замещается (например, с помощью последовательно проводимых во времени действий) образцовой.

Из всех перечисленных методов нулевой метод обеспечивает наибольшую точность измерений физической величины. Его разновидностями являются:

- *компенсационный метод*, при котором действие измеряемой величины компенсируется (уравновешивается) образцовой;
- *мостовой метод*, когда достигают нулевого значения тока в измерительной диагонали моста, в которую включается чувствительный индикаторный прибор (обычно нуль-индикатор).

## 1.8. Средства измерений

*Средствами измерений (СИ)* называют техническое средство, предназначенное для измерений, имеющее нормированные метрологические характеристики, воспроизводящее и (или) хранящее единицу физической величины, размер которой принимают неизменной (в пределах установленной погрешности) в течение известного интервала времени.

### 1.8.1. Классификация средств измерения

Множество измеряемых величин, а также широкий диапазон их возможных значений приводят к многообразию принципов, на которых базируется построение радиоэлектронной измерительной аппаратуры. Например, методы измерений и конструкции приборов, осуществляющих измерения в различных частотных диапазонах, могут принципиально отличаться друг от друга. В диапазоне низких частот геометрические размеры прибора много меньше длины волны колебаний, что позволяет строить измерительную аппаратуру на элементах с сосредоточенными параметрами. На сверхвысоких частотах размеры измерительных элементов средств измерений сравнимы с длиной волны электромагнитных колебаний, а результаты измерения зависят от места подключения прибора, его конструкции и размеров. Классификация по назначению, роли в процессе измерения и

выполняемым функциям является основной и представлена на рис. 1.8.



Рис. 1.8. Классификация средств измерений

Средства измерения используются для сбора измерительной информации, ее измерения, передачи, представления.

Средств измерения делятся на:

1. Эталоны.
2. Меры.
3. Измерительные приборы
4. Измерительные преобразователи.
5. Измерительные установки.
6. Информационно - измерительные системы (ИИС).
7. Измерительно-вычислительные комплексы (ИВК).
8. Интеллектуальные средства измерения.

**Мера** – средство измерения для воспроизведения, хранения и передачи физической величины определенного размера.

**Измерительный прибор** – средство измерения, предназначенное для получения измерительной информации, пригодной для непосредственного восприятия наблюдателем (отсчетное устройство).

**Измерительная установка** – совокупность функционально объединённых средств измерений и вспомогательных устройств, предназначенная для выработки сигнала измерительной информации в форме, удобной для непосредственного восприятия наблюдателем и расположенная в одном месте.

**Измерительная система** - совокупность средств измерений и вспомогательных устройств, соединённых между собой каналами связи, предназначенная для выработки сигналов измерительной информации в форме, удобной для автоматической обработки, передачи и (или) использования в системах управления, контроля, диагностирования и т.п.

**Измерительный преобразователь** - средство измерений, предназначенное для преобразования сигналов измерительной информации в форму, целесообразную для передачи, обработки или хранения. Измерительная информация на выходе измерительного преобразователя, как правило, недоступна для непосредственного восприятия наблюдателем.

*По назначению* средства измерений делятся на **рабочие, рабочие эталоны и индикаторы.**

Рабочие средства измерений разделяются на *технические* и *лабораторные*. Первые предназначены для измерений в производственных условиях. По конструкции технические средства измерений приспособлены для установки на щитах, в шкафах и непосредственно на оборудовании.

*Лабораторные средства измерений* предназначаются для использования в научно-исследовательской практике, при

испытаниях оборудования в стендовых условиях. Отличаются более высокими точностными характеристиками.

*Рабочие эталоны* предназначаются для поверки рабочих средств или других менее точных образцовых в условиях специализированных измерительных лабораторий.

*Индикаторами* называют средства измерения, не имеющие нормированных точностных характеристик и служащие для ориентировочной оценки измеряемой величины.

Любое средство измерения может рассматриваться как некая измерительная цепь. Работа средства измерения характеризуется функцией преобразования. Функция преобразования является обобщённой характеристикой измерительной цепи или её элементов. Статическая функция преобразования и её параметры определяют свойства измерительной цепи или её элементов в установившемся состоянии, т.е. при неизменном значении входной величины. В условиях меняющейся входной величины проявляются динамические свойства средства измерения.

Основой измерений являются наблюдения, которые осуществляются персоналом или автоматическими устройствами. При однократном наблюдении результат измерения равен результату наблюдения, т.е.  $X = x$ . Измерение дополняется оценкой точности, которая должна быть не хуже, чем определено требованиями.

В практике испытаний и исследований, где требуется более высокая точность, прибегают к нескольким наблюдениям для проведения одного измерения. Такой метод называют *методом многократных наблюдений*. При этом удаётся учесть влияние некоторых случайных факторов. При многократных наблюдениях результат наблюдений, результат измерения, а также оценку точности получают методами статистической обработки случайных величин.

Государственным стандартом установлены следующие требования производства линейных и угловых измерений:

- температура окружающей среды  $20\text{ C}^0$ ;
- атмосферное давление  $101324,72\text{ Па}$  ( $760\text{ мм рт. ст.}$ );

- относительная влажность окружающего воздуха 58%;
- ускорение свободного падения 9,8 м/с кв.
- направление линии измерения линейных размеров до 160 мм наружных поверхностей - вертикальное, в остальных случаях – горизонтальное;
- относительная скорость измерения углов, равная нулю.

В зависимости от конструкции, принципа действия и возможности использования **измерительные приборы** делятся на:

1. Электромеханические
2. Электронные.
3. Цифровые.
4. Аналого-дискретные.

В Российской Федерации согласно соответствующему стандарту все радиотехнические измерительные приборы и соответствующие им меры электрических величин по характеру измерений и виду измеряемых величин разделены на подгруппы, обозначаемые прописными буквами русского алфавита. При этом приборы делятся на 20 подгрупп:

А — измерители силы тока; Б — источники питания для схем измерений и измерительных приборов; В — измерители напряжения; Г — генераторы измерительные; Д — измерители ослабления и аттенюаторы; Е — измерители параметров элементов с сосредоточенными постоянными; И — приборы для импульсных измерений; К — комплексные измерительные установки; Л — измерители параметров электронных ламп и полупроводниковых приборов; М — измерители мощности; П — измерители напряженности поля и радиопомех; Р — измерители параметров элементов и трактов с распределенными постоянными; С — приборы для наблюдения, измерения и исследования формы сигналов и их спектров; У — усилители измерительные; Ф — измерители фазовых сдвигов и группового времени запаздывания; Х — приборы для наблюдения и исследования характеристик



электрических цепей и радио-устройств; Ч — измерители частоты; Ш — измерители электрических и магнитных свойств материалов; Э — измерительные устройства коаксиальных и волноводных трактов; Я — блоки радиоизмерительных приборов.

Входящие в подгруппу измерительные приборы подразделяются на виды в соответствии с основной выполняемой функцией. Видам присваивается буквенно-цифровое обозначение, состоящее из буквы подгруппы и номера вида. Так, например, вид «Вольтметры переменного тока» обозначается как ВЗ, вид «Вольтметры импульсного тока» — В4 и т. д. Полное наименование прибора определяется наименованием вида, к которому прибор относится.

В соответствии с совокупностью технических характеристик и очередностью разработок приборы всех видов разделяются на типы, которым соответствует порядковый номер модели. Обозначение прибора состоит из обозначения вида и номера модели, причем перед последним ставится дефис. В частности, надпись на измерительном приборе ВЗ-40 говорит о том, что это сороковая модель вольтметров переменного тока.

Решением Международного консультативного комитета по радио (МККР) рекомендована определенная система разделения и наименований полос в спектре частот, применяемом для радиосвязи, радиовещания и телевидения. Согласно этой рекомендации установлены следующие диапазоны:

- крайне низких частот (КНЧ) — 3...30 Гц;
- сверхнизких частот (СНЧ) — 30... 300 Гц;
- инфранизких частот (ИНЧ) — 300... 3000 Гц;
- очень низких частот (ОНЧ) — 3... 30 кГц;
- низких частот (НЧ) — 30...300 кГц;
- средних частот (СЧ) — 300.. 3000 кГц;
- высоких частот (ВЧ) — 3... 30 МГц;
- очень высоких частот (ОВЧ) — 30.. 300 МГц;
- ультравысоких частот (УВЧ) — 300... 3000 МГц;

сверхвысоких частот (СВЧ) — 3... 30 ГГц;  
крайне высоких частот (КВЧ) — 30..300 ГГц;  
гипервысоких частот (ГВЧ) — 300..3000 ГГц.

В ряде официальных российских документов на средства измерений и некоторой литературе по радиоизмерениям еще остается традиционное деление на диапазоны частот: инфранизких (ИНЧ) — до 20 Гц; низких (НЧ) — от 20 Гц до 300 кГц; высоких (ВЧ) — от 30 кГц до 300 МГц; сверхвысоких (СВЧ) — свыше 300 МГц.

## 1.9. Основные показатели измерительных приборов

Измерительные приборы, применяемые в радиотехнике, характеризуются следующими основными показателями.

*Диапазон измерений* — область значений измеряемой величины, для которой нормированы допускаемые погрешности измерительного прибора (средства измерения).

*Диапазон показаний* - размеченная область шкалы, ограниченная ее начальным и конечным значениями, т. е. указанными на ней наименьшим  $X_{min}$ , и наибольшим  $X_{max}$  возможными значениями измеряемой величины (он может быть шире диапазона измерений).

*Предел измерений* — наибольшее или наименьшее значение диапазона измерений.

*Область рабочих частот* (диапазон частот) — полоса частот, в пределах которой погрешность прибора, полученная при изменении частоты сигнала, не превышает допускаемого предела.

*Градуировочная характеристика* — это зависимость, определяющая соотношение между сигналами на выходе и входе средства измерений в статическом режиме.

*Чувствительность по измеряемому параметру* — отношение изменения сигнала на выходе измерительного прибора к вызвавшему его изменению измеряемой величины:

$$S = \lim_{n \rightarrow \infty} \left( \frac{\Delta y}{\Delta x} \right) = \frac{dy}{dx} ,$$

где  $x$  — измеряемая величина,  $y$  — сигнал на выходе;  $\Delta x$  — изменение измеряемой величины;  $\Delta y$  — изменение сигнала на выходе.

*Предельная чувствительность* (по напряжению, току или мощности) — минимальная величина исследуемого сигнала (напряжения, тока или мощности), подаваемого на вход прибора, которая необходима для получения отсчета с погрешностью, не превосходящей допустимой.

*Разрешающая способность (абсолютная)* — минимальная разность двух значений измеряемых однородных величин, которая может быть различима с помощью прибора.

*Быстродействие (скорость измерения)* — максимальное число измерений в единицу времени, выполняемых с нормированной погрешностью.

*Время измерения* — время, которое требуется для определения значения измеряемой величины с заданной погрешностью.

*Входное сопротивление (полное)  $Z_{вх}$*  — сопротивление измерительного прибора со стороны его входных зажимов. На сравнительно низких частотах входную цепь прибора, включаемого параллельно измеряемой цепи, можно представить эквивалентной схемой, состоящей из соединенных параллельно резистора  $R_{вх}$  и конденсатора  $C_{вх}$ .

Чтобы не влиять на измеряемую цепь, измерительные приборы должны иметь как можно большее активное входное сопротивление  $R_{вх}$  и возможно меньшую входную емкость  $C_{вх}$ . Поэтому в области низких частот  $\omega = 2\pi f$ , когда емкостное сопротивление велико по сравнению с активным сопротивлением  $1/(\omega C_{вх}) \gg R_{вх}$ , практически входное сопротивление измерительного прибора  $Z_{вх} = R_{вх}$ . В области высоких частот входное сопротивление прибора определяется преимущественно емкостью и  $Z_{вх} = 1/(\omega C_{вх})$ , так как в этом случае  $1/(\omega C_{вх}) \ll R_{вх}$ .

*Выходное сопротивление*  $Z_{\text{вых}}$  — сопротивление измерительного прибора со стороны его выходных зажимов. Это сопротивление определяет допустимую нагрузку прибора при подключении его, например, к компьютеру.

*Порог чувствительности* — изменение измеряемой величины, вызывающее наименьшее изменение показаний, обнаруживаемое наблюдателем при нормальном для данного прибора способе отсчета

*Показание* — значение измеряемой величины, определяемое по отсчетному устройству прибора и выраженное в единицах этой величины.

*Вариация показаний* — разность между показаниями прибора в одной и той же точке диапазона измерений при плавном подходе к ней со стороны меньших и больших значений измеряемой величины.

*Собственная потребляемая мощность*  $P_{\text{соб}}$  — мощность, потребляемая от измеряемой цепи (чем  $P_{\text{соб}}$  меньше, тем точнее измерения).

*Диапазон преобразования* — это область входных величин, в пределах которой элемент или измерительная цепь обеспечивают реализацию функции преобразования.

### 1.9.1. Статические характеристики

Дефекты статической функции преобразования являются источниками погрешностей измерений. К ним относят нелинейность функции преобразования, гистерезис, порог чувствительности, дрейф нуля [15].

*Нелинейность* оценивают приведенным значением, т. е. отношением максимальной разности к диапазону преобразования.

$$n_d = (d_{\text{max}}/x_{\text{max}}) 100\%.$$

*Гистерезис* – это явление, вызывающее неоднозначность функции преобразования при увеличении и при уменьшении входной величины. Относительное приведенное значение гистерезиса определяется по максимальной ширине петли:

$$n_g = (g_{\max} / x_{\max}) 100\%.$$

*Порог чувствительности* выражается в том, что плавному изменению входной величины соответствует ступенчатое изменение выходной. Минимальный прирост входной величины, вызывающий изменение выходной величины, называется **порогом чувствительности** и может выражаться в абсолютных значениях входной величины или в относительной форме:

$$n_s = (s / x_{\max}) 100\% ,$$

где  $s$  - абсолютное значение порога чувствительности.

Дрейф или смещение нуля приводит к соответствующему смещению функции преобразователя. Дрейф нуля задаётся в абсолютных или относительных единицах, отнесённых к контрольному промежутку времени (час, сутки и т.д.).

### 1.9.2. Динамические характеристики

В условиях переменного входного сигнала задача средств измерений состоит в воспроизведении сигнала с наименьшими искажениями. Реальные средства измерений вносят в измеряемую величину динамические искажения.

Целью обработки результатов динамических измерений является:

1 - нахождение сигнала на выходе средства измерения  $x(t)_{изм}$  по заданному сигналу на входе  $x(t)_{ист}$ ;

2 - нахождение входной величины  $x(t)_{уст}$  по значениям выходной величины  $x(t)_{изм}$ .

В ряде случаев предварительное оценивание динамических погрешностей необходимо для выбора средства измерения с такими динамическими свойствами, чтобы при известном характере входного сигнала динамические погрешности не превосходили допустимых значений.

Динамические характеристики средств измерения подразделяются на *полные* и *частные*. К полным динамическим характеристикам относятся дифференциальное уравнение, передаточная функция, переходная и импульсная переходная характеристика, совокупность амплитудно-частотной и фазо-частотной характеристик.

### **Дифференциальное уравнение**

Динамический режим широкого класса измерений может быть описан линейным дифференциальным уравнением с постоянными коэффициентами [14].

$$\sum_{i=1}^n \frac{A_i d^i x(t)_{изм}}{dt^i} = \sum_{l=0}^l \frac{B_l d^l x(t)_{уст}}{dt},$$

где  $i, l$ —порядок производных от  $x(t)_{изм}$  и  $x(t)_{уст}$ ;  $A_i, B_l$ —коэффициенты.

В статическом режиме при  $x_{уст} = const$ ,  $x_{изм} = const$  уравнение вырождается в  $x_{изм} = Kx_{уст}$ , где  $K = B_0/A_0$ —*номинальный коэффициент преобразования средства измерений*.

Решение дифференциального уравнения позволяет оценить динамическую погрешность и получить исправленный результат измерения, если известны коэффициенты  $A_i$  и  $B_l$ .

Однако коэффициенты уравнения трудно определить расчётом и экспериментально, поэтому дифференциальное уравнение, как динамическая характеристика, для оценивания

результатов измерения и динамических погрешностей не нашло широкого применения на практике.

### Передаточная функция

Выразив входящие в дифференциальное уравнение  $x(t)_{уст}$  и  $x(t)_{изм}$  в операторной форме, запишем уравнение в виде

$$\sum_{i=0}^n A_i p^i x(p)_{изм} = \sum_{l=0}^m B_l p^l x(p)_{уст},$$

где  $p$  - оператор дифференцирования  $d/dt$ .

**Передаточной функцией**  $W(p)$  называют отношение изображения выходной величины динамической системы к изображению входной величины

$$W(p) = \frac{\sum_{i=0}^n A_i p^i}{\sum_{l=0}^m B_l} = \frac{(A_0 + A_1 p + A_2 p^2 + \dots + A_n p^n)}{(B_0 + B_1 p + B_2 p^2 + \dots + B_m p^m)}$$

Как правило, передаточные функции реальных средств измерения удаётся с достаточной степенью точности аппроксимировать простым выражением ( $n=2-3, n < m$ ).

Если известен закон изменения величины  $x(t)_{уст}$  и передаточная функция средства измерения, то определяют изображение  $x(p)_{изм} = W(p)x(p)_{уст}$ , а затем переходят к оригиналу.

Заменив  $p$  на  $j\omega$ , получим комплексную (амплитудно-фазовую) характеристику, действительная часть которой является амплитудно-частотной характеристикой  $A(\omega)$ , а мнимая — фазо-частотной  $\varphi(\omega)$ .

### Переходная характеристика

Отклик средства измерения на ступенчатое возмущение называется **переходной характеристикой**  $h(t)$ .

Реакция средства измерения на воздействие единичного импульса с параметрами  $x = 0$  при  $t \neq 0$  и  $x = \infty$  при  $t = 0$ , называется **импульсной переходной** характеристикой  $g(t)$ . Математически такой единичный импульс (дельта-функция) представляет собой производную от единичной ступенчатой функции. Переходная и импульсная переходная характеристики сравнительно просто определяются экспериментально путём подачи на вход средства измерения соответствующего ступенчатого или импульсного входного сигнала.

### 1.10. Эталоны единиц электрических величин

Средства измерений, предназначенные для воспроизведения и хранения единиц измерений, поверки и градуировки приборов делятся на эталоны и образцовые средства измерения

*Эталон* — средство измерения (или комплекс средств измерений), обеспечивающее воспроизведение и (или) хранение единицы физической величины с наивысшей точностью для данного уровня развития измерительной техники с целью передачи ее размера нижестоящим по поверочной схеме средствам измерений. Классификация, назначение и общие требования к созданию, хранению и применению эталонов устанавливаются соответствующими стандартами.

Конструкция эталона, его физические свойства и способ воспроизведения единицы определяются физической величиной, единица которой воспроизводится, и уровнем развития измерительной техники в данной области измерений. Эталон должен обладать, по крайней мере, тремя взаимосвязанными свойствами; неизменностью, воспроизводимостью и сличаемостью.

*Неизменность* — свойство эталона удерживать неизменным размер воспроизводимой им единицы физической величины в течение длительного интервала времени. При этом



все изменения, зависящие от внешних условий, должны быть строго определенными функциями величин, доступных точному измерению. Реализация этих требований привела к созданию «естественных» эталонов различных величин, основанных на физических постоянных.

*Воспроизводимость* — возможность воспроизведения единицы физической величины с наименьшей погрешностью для существующего уровня развития измерительной техники.

*Сличаемость* — возможность сличения с эталоном других средств измерений, нижестоящих по поверочной схеме, в первую очередь вторичных эталонов, с наивысшей точностью для существующего уровня развития техники измерения.

Эталоны классифицируют в зависимости от метрологического назначения. Это назначение предполагает оснащение метрологической службы первичными, специальными, государственными, национальными, международными и вторичными эталонами (рис. 1.6).

*Первичный эталон* — эталон, обеспечивающий воспроизведение единицы с наивысшей в стране точностью. Первичные эталоны — это уникальные средства измерений, часто представляющие собой сложнейшие измерительные комплексы. Они составляют основу государственной системы обеспечения единства измерений.

Первичный эталон может быть специальным, государственным, национальным и международным.

*Специальный эталон* — эталон, обеспечивающий воспроизведение единицы в особых условиях и заменяющий для этих условий первичный эталон. Он служит для воспроизведения единицы в условиях, когда первичный эталон нельзя использовать, и прямая передача размера единицы от первичного эталона с требуемой точностью технически неосуществима (например, на высоких и сверхвысоких частотах, в начале и конце участков диапазонов измерений и т. д.).

Первичные и специальные эталоны являются исходными для страны, их утверждают в качестве *государственных*.

*Вторичный эталон* — эталон, значение которого устанавливают по первичному эталону. Вторичные эталоны являются частью подчиненных средств хранения единиц и передачи их размеров, создаются и утверждаются в тех случаях, когда это необходимо для организации поверочных работ, а также хотя обеспечения сохранности и наименьшего износа государственного эталона. По метрологическому назначению вторичные эталоны делятся на эталоны-свидетели, эталоны-копии, эталоны сравнения и рабочие эталоны.

*Эталон-свидетель* служит для проверки сохранности и неизменности государственного эталона и замены его в случае порчи или утраты. В настоящее время только эталон килограмма имеет эталон-свидетель.

*Эталон-копия* предназначен для передачи размера единицы рабочим эталонам. Он создается в случае необходимости проведения большого числа поверочных работ с целью предохранения первичного или специального эталона от преждевременного износа. Эталон-копия представляют собой копию государственного эталона только по метрологическому назначению, поэтому он не всегда является его физической копией.

*Эталон сравнения* применяется для взаимного *сличения* эталонов, которые по тем или иным причинам нельзя непосредственно сравнивать друг с другом (например, международные сличения эталонов).

*Рабочие эталоны* предназначены для поверки образцовых и наиболее точных рабочих средств измерений. Рабочие эталоны применяются во многих территориальных метрологических центрах.

Оценки погрешностей вторичных эталонов характеризуют отклонением размеров хранимых ими единиц от размера единицы, воспроизводимой первичным эталоном.

*Передача размера единицы* — это приведение размера единицы физической величины, хранимой поверяемым средством измерений, к размеру единицы, воспроизводимой или хранимой эталоном, осуществляемое при их поверке или калибровке. Размер единицы передается «сверху вниз» — от более точных средств измерений к менее точным.

*Образцовым средством измерения* называется мера, измерительный прибор или преобразователь, утвержденные в качестве образцовых и служащие для поверки по ним других средств измерений. От образцовых средств измерений размеры единиц физических величин передаются далее рабочим мерам и измерительным приборам, т.е. рабочим средствам измерений.

*Рабочими* называют такие средства измерений, которые применяются для измерений, не связанных с передачей размера единиц.

Общие требования к образцовым средствам измерений, их метрологической аттестации и применению регламентируются стандартами и рекомендациями по метрологии. В частности, предусматривается создание образцовых средств измерений одной и той же физической величины нескольких уровней точности — *разрядов*. При этом образцовые средства измерений 1-го разряда считаются *исходными* и подлежат поверке непосредственно по рабочим эталонам. Образцовые средства измерений 2-го, 3-го и последующих разрядов являются *подчиненными* и подлежат поверке по образцовым средствам измерений 1-го, 2-го и последующих разрядов соответственно. Наконец, образцовые средства измерений могут объединяться в измерительные *поверочные* установки, позволяющие быстро выполнять все операции поверки.

Важным при поверке является выбор оптимального соотношения между допускаемыми погрешностями образцового и поверяемого средства измерений. Обычно на практике, когда при поверке вводят поправки на показания образцовых средств измерений, это соотношение принимается 1:3 (исходя из критерия ничтожно малой погрешности —

ошибка I рода). Если же поправки не вводят, то образцовые средства измерений выбирают из соотношения 1:5 (ошибка II рода). Соотношение допускаемых погрешностей поверяемых и образцовых средств измерений устанавливается с учетом принятого метода поверки, характера погрешностей, допускаемых значений ошибок I и II родов и иногда может значительно отличаться от указанных ранее цифр.

### **1.11. Понятия счета, испытания, контроля и поверки**

*Счет* — процедура определения численности качественно однотипных объектов в данной их совокупности. Результатом счета является число объектов. Основные характеристики счета — достоверность и скорость.

*Испытание* — экспериментальное определение количественных и (или) качественных характеристик свойств объекта как результата заданного воздействия на него при его функционировании и (или) при моделировании испытываемого образца и (или) воздействий.

*Объектом испытаний* является продукция или процессы ее производства и функционирования. В зависимости от вида продукции и программы испытаний объектом может быть макет или модель изделия, как единичное изделие, так и их партия.

Под *условиями испытаний* понимают совокупность воздействующих факторов и (или) режимов функционирования объекта при испытаниях. Испытания классифицируют по ряду признаков. По *назначению* испытания делят на исследовательские, контрольные, сравнительные и определительные. По *уровню проведения* различают: государственные, межведомственные и ведомственные. По *виду этапов разработки испытываемой продукции* различают предварительные и приемочные испытания. В зависимости от *вида испытаний готовой продукции* их подразделяют на квалификационные, приемо-сдаточные, периодические и типовые.

*Целью испытаний* считают нахождение истинного значения параметра, определенного не при тех реальных условиях, в которых он фактически может находиться в ходе испытаний, а в заданных номинальных условиях испытания. Реальные условия испытаний практически всегда отличаются от номинальных. Значит, результат испытания всегда имеет погрешность, возникающую не только из-за погрешности определения искомой характеристики, но и из-за неточного установления номинальных условий испытания

*Результатам испытаний* называется оценка характеристик свойств объекта, установления соответствия объекта заданным требованиям, данные анализа качества функционирования объекта в процессе испытаний. Результат испытаний характеризуется *точностью* — свойством испытаний, описывающим близость их результатов к действительным значениям характеристик объекта в определенных условиях испытаний

*Контроль (проверка)* — процесс определения соответствия параметра изделия установленным требованиям или нормам. Контроль заключается в проведении двух этапов. На первом получают информацию о фактическом состоянии объекта, о признаках и показателях его свойств. Это *первичная* информация. На втором этапе первичную информацию сопоставляют с заранее установленными требованиями и нормами. При этом выявляют соответствие или несоответствие фактических данных требуемым. Информация об их расхождении называется *вторичной*.

*Поверка* — определение специальным органом метрологической службы метрологических характеристик средства измерения и установление его пригодности к применению на основании результатов контроля их соответствия предъявляемым требованиям. Основной метрологической характеристикой, определяемой при поверке средства измерений, является его погрешность. Она находится на основании сравнения поверяемого средства измерений с более точным средством измерений — рабочим эталоном.

Стандартом на термины и определения в области испытаний и контроля качества продукции понятие контроль формулируется как проверка соответствия показателей качества продукции установленным требованиям. Контроль, осуществляемый с применением средств измерения, называется измерительным контролем. Частным случаем измерительного контроля является *допусковый контроль*, цель которого – установить, находится ли контролируемый параметр объекта в пределах заданного допуска.

Необходимо различать, чем процедура измерения отличается от процедуры контроля. *Цель измерения* – определение значения физической величины. *Цель контроля* – обоснование заключения «годен – не годен» или «брак - норма». Результата измерения должен сопровождаться оценкой погрешности. Результата контроля должен сопровождаться указанием степени достоверности контроля. В качестве оценок достоверности контроля вводится понятие вероятности ошибок 1-го и 2-го рода.

*Ошибка 1-го рода* – годное изделие идентифицируется как негодное.

*Ошибка 2-го рода* – негодное изделие идентифицируется как годное.

Вероятность получения верного результата определяется по формуле

$$P_b = 1 - (P_1 + P_2),$$

где  $P_b$  – вероятность получения верного результата;  $P_1$  – вероятность ошибки 1-го рода;  $P_2$  – вероятность ошибки второго рода.

Если бы средство измерения не имело погрешностей, то измеряя контролируемый параметр каждого из изделий, можно было бы абсолютно безошибочно отделить бракованные изделия от годных, т.е. обеспечить  $P_b = 1$ .

Реальные же средства измерения обладают погрешностью, поэтому и возникают ошибки 1-го и 2-го рода.

При практическом осуществлении контроля партий изделий влияние погрешностей измерения оценивают параметрами:

$m$  – количество изделий (в процентах от общего числа измеренных), имеющих размеры, превышающие предельно допустимые, но принятые как годные (ошибка 2-го рода);

$n$  – количество изделий (в процентах от общего числа измеренных), имеющих размеры, не превышающие предельно допустимые, но забракованные (ошибка 1-го рода).

Параметры  $m$  и  $n$  определяют по таблице (табл. 1.4) или графикам в зависимости от отношения

$$A = \frac{\sigma}{\Delta_i} \cdot 100,$$

где  $\sigma$  - среднее квадратическое отклонение (СКО) погрешности измерения;

$\Delta$  - допуск контролируемого параметра.

Таблица 1.4

Параметры  $m$  и  $n$  в зависимости от  $A$

$A, \%$	$m, \%$	$n, \%$
1,6	0,37 - 0,39	0,7 - 0,75
3	0,87 - 0,90	1,2 - 1,3
5	1,6 - 1,7	2,0 - 2,25
...	...	...
12	3,75 - 4,1	5,4 - 5,8
16	5,0 - 5,4	7,8 - 8,25

## 2. ПОГРЕШНОСТЬ ИЗМЕРЕНИЙ. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

Мерой оценки точности измерений является погрешность. **Погрешность** характеризует отклонение измеренного значения некоторой величины от её истинного (действительного) значения.

Погрешности появляются из-за несовершенства применяемых методов и средств измерений, непостоянства влияющих на результат измерения физических величин и индивидуальных особенностей экспериментатора. Кроме того, на точность измерений влияют внешние и внутренние помехи, климатические условия и порог чувствительности измерительного прибора [1, 7].

Оценивая погрешности измерения, следует понимать, что уровень точности, к которому необходимо стремиться, должен определяться критериями технической и экономической целесообразности. В метрологии установлено, что увеличение точности измерения вдвое удорожает само измерение в два-три раза. В то же время снижение точности измерения в производстве ниже определенной нормы приводит к появлению существенного брака изделий. При установлении точности измерений важно также учитывать их значимость. В одних случаях недостаточная точность получаемой измерительной информации имеет небольшое или локальное значение, в других — играет исключительно важную роль: от точности измерения могут зависеть как здоровье и жизнь людей, так и научное открытие.

### 2.1. Классификация погрешностей измерений

Различают измерения с точной, приближенной и предварительной оценкой погрешностей.

При измерениях с *точной оценкой погрешности* учитывают индивидуальные метрологические свойства и характеристики каждого из примененных средств измерения,



анализируют метод измерений, контролируют условия измерений с целью учета их влияния на результат измерения.

Если измерения ведут с *приближенной оценкой погрешности*, то учитывают лишь метрологические характеристики средства измерения и оценивают влияние на их результат только отклонения условий измерения от нормальных.

Измерения с *предварительной оценкой погрешности* выполняются по типовым методикам, регламентированным нормативными документами, в которых указаны методы и условия измерений, типы и погрешности используемых средств измерений и на основе этих данных заранее оценена возможная погрешность результата.

Рассмотрим основные признаки, по которым классифицируют погрешности (рис. 2.1).

По форме количественного выражения погрешности измерения разделяются на абсолютные, относительные и приведенные.



Рис. 2.1. Классификация погрешностей измерений

**Абсолютной погрешностью**  $\Delta$  называется отклонение результата измерения  $x$  от истинного значения  $x_u$

$$\Delta = x - x_u, \quad (2.1)$$

где  $x$  – истинное значение;  $x_u$  - результат измерения.

Абсолютная погрешность выражается в тех же единицах, что и измеряемая величина.

Разновидностью абсолютной погрешности является *предельная погрешность*  $\Delta_m$  — погрешность, больше которой в данном измерительном эксперименте не может появиться.

Абсолютная погрешность характеризует величину и знак полученной погрешности, но не определяет качество самого измерения.

Характеристикой качества измерения является *точность измерений*, отражающей меру близости результатов измерений к истинному значению измеряемой величины. Иначе говоря, высокой точности измерений соответствует малая погрешность. Так, например, измерение силы тока в 10 А и 100 А может быть выполнено с идентичной абсолютной погрешностью  $\Delta=+1\text{А}$ . Однако качество первого измерения хуже второго. Поэтому, чтобы иметь возможность сравнивать качество измерений, используют относительную погрешность.

*Относительной погрешностью*  $\delta$  называется отношение абсолютной погрешности измерения к истинному значению измеряемой величины:

$$\delta = \Delta / x_u,$$

Мерой точности измерений служит показатель, обратный модулю относительной погрешности:

$$K_T = 1 / |\delta|.$$

Относительную погрешность  $\delta$  часто выражают в процентах:

$$\delta = \frac{\Delta}{x_u} \cdot 100\% .$$

Если измерение выполнено однократно и за абсолютную погрешность результата измерения  $\Delta$  принята разность между показанием прибора и истинным значением измеряемой величины  $x_u$  то из (2.1) следует, что значение относительной погрешности  $\delta$  уменьшается с ростом  $x_u$  (здесь предполагается независимость  $\Delta$  от  $x_u$ ). Поэтому для измерений целесообразно выбирать такой прибор, показания которого были бы в последней части его шкалы (диапазона измерений), а для сравнения различных приборов использовать понятие приведенной погрешности.

*Приведенной погрешностью*  $\gamma$ , выражающей потенциальную точность измерений, называется отношение абсолютной погрешности  $\Delta$  к некоторому нормирующему значению  $X_N$  (например, к конечному значению шкалы прибора или сумме значений шкал при двусторонней шкале):

$$\gamma = 100 \frac{\Delta}{X_N} \% .$$

По характеру (закономерности) проявления погрешности измерений подразделяются на три основных класса: систематические, случайные и грубые (промахи).

*Систематические погрешности*  $\Delta_c$  — составляющие погрешности измерений, остающиеся постоянными или закономерно изменяющиеся при многократных измерениях одной и той же величины в одних и тех же условиях. Такие погрешности могут быть выявлены путем детального анализа возможных их источников и уменьшены введением соответствующей поправки, применением более точных приборов, калибровкой приборов с помощью рабочих мер и т. п. Однако полностью их устранить нельзя.

*Случайные погрешности*  $\Delta^\circ$  — составляющие погрешности измерений, изменяющиеся случайным образом по значению и знаку при повторных измерениях одной и той же физической величины в одних и тех же условиях.

Данные погрешности проявляются при повторных измерениях одной и той же физической величины в виде некоторого разброса получаемых результатов. Практически случайные погрешности неизбежны, неустранимы и всегда имеют место в результате измерения. Их описание и оценка возможны только на основе теории вероятностей и математической статистики.

Случайные погрешности нельзя исключить из результатов измерений введением поправки. Однако их можно уменьшить путем многократного измерения физической величины и последующей статистической обработкой полученных результатов.

*Грубые погрешности (промахи)* — погрешности, существенно превышающие ожидаемые при данных условиях измерения. Данные погрешности возникают из-за ошибок оператора или неучтенных внешних воздействий. В случае однократного измерения обнаружить промахи нельзя. При этом целесообразно выполнить два-три измерения и за результат принять их среднее арифметическое значение. При многократных наблюдениях промахи выявляют в процессе обработки их результатов и исключают из рассмотрения, пользуясь определенными правилами.

Таким образом, если не учитывать промахи, абсолютная погрешность измерения  $\Delta$  определяемая выражением (2.1), представляется суммой систематической  $\Delta_c$  и случайной  $\Delta^\circ$  составляющих:

$$\Delta = \Delta_c + \Delta^\circ .$$

### 2.1.1. Систематическая погрешность

По характеру изменения во времени систематические погрешности подразделяют на постоянные и переменные.

*Постоянными* называются такие систематические погрешности измерения, которые остаются неизменными в течение всей серии измерений (сохраняют величину и знак). Например, погрешности из-за ошибки установки нуля вольтметра или калибровки осциллографа и т. п.

*Переменными* называются погрешности, изменяющиеся в процессе измерения. Наличие существенной переменной систематической погрешности искажает оценки характеристик случайной погрешности. Поэтому она должна обязательно выявляться и исключаться из результатов измерений.

Классификация систематических погрешностей:

1 - инструментальные, которые свойственны средствам измерения и являются следствием дефектов их статических характеристик;

2 - методические, возникающие из-за несовершенства методики измерения либо из-за несоответствия методики поставленной задаче;

3 - субъективные, вызванные ошибками наблюдателя при отсчёте показаний (небрежность, параллакс, ошибка при интерполяции).

*Нормированная погрешность* является паспортной характеристикой средства измерения и может быть задана в виде абсолютной, относительной или приведенной погрешности. В некоторых случаях, например при изготовлении нестандартных средств или при желании сузить пределы допустимой систематической погрешности, их подвергают индивидуальным градуировкам.

Пределы допустимых погрешностей средств измерений (паспортные или индивидуальные) должны рассматриваться как границы основной неисключенной систематической погрешности. Уменьшить систематические погрешности можно, устраняя или уменьшая изменения внешних условий

(стабилизация питающего напряжения, термостабилизация, экранирование и т.п.)

Единственным путём выявления необнаруженных систематических погрешностей является проведение измерений двумя или несколькими независимыми методами, обладающими приблизительно одинаковыми постоянными и переменными систематическими погрешностями. Грубое расхождение между результатами, полученными разными методами, указывает на наличие в одном из каналов измерений недопустимой систематической погрешности.

### ***Методы исключения систематической погрешности***

Результаты измерений, содержащие систематическую погрешность, относятся к *неисправленным*. При проведении измерений стремятся исключить, уменьшить или учесть влияние систематических погрешностей. Однако вначале их надо обнаружить.

Постоянные систематические погрешности можно обнаружить только путем сравнения результатов измерений с другими, полученными с использованием более точных методов и средств измерения. В ряде случаев такие погрешности можно устранить, используя специальные методы измерений.

Рассмотрим наиболее известные методы исключения (существенного уменьшения) постоянных систематических погрешностей.

*Метод замещения* обеспечивает наиболее полное решение задачи компенсации постоянной систематической погрешности. Суть метода состоит в такой замене измеряемой величины  $x$  известной величиной  $A$ , получаемой с помощью регулируемой меры, чтобы показание измерительного прибора сохранилось неизменным. Значение измеряемой величины считывается в этом случае по указателю меры.

При использовании данного метода погрешность неточного измерительного прибора устраняется, а погрешность измерения определяется только погрешностью самой меры и

погрешностью отсчета измеряемой величины по указателю меры.

*Метод компенсации погрешности по знаку* (метод двух отсчетов или изменения знака систематической погрешности) используется для устранения постоянной систематической погрешности, у которой в зависимости от условий измерения изменяется только знак. При этом методе выполняют два измерения, результаты которых должны быть равны  $x_1 = x_u + \Delta_c$  и  $x_2 = x_u - \Delta_c$ , где  $x_u$  — измеряемая величина. Среднее значение из полученных результатов  $(x_1 + x_2)/2 = x_u$  представляет собой окончательный результат измерения, не содержащий погрешности  $\pm \Delta_c$ . Данный метод часто используется при измерении экстремальных значений (максимума и нуля) неизвестной величины.

*Метод противопоставления* применяется в радиоизмерениях для уменьшения постоянных систематических погрешностей при сравнении измеряемой величины с известной величиной примерно равного значения, воспроизводимой соответствующей образцовой мерой. Этот метод является разновидностью метода сравнения, при котором измерение выполняется дважды и проводится так, чтобы в обоих случаях причина постоянной погрешности оказывала разные, но известные по закономерности воздействия на результаты наблюдений.

*Метод рандомизации* (от англ. *random* — случайный, беспорядочный; в переводе на русский означает: перемешивание, создание беспорядка, хаоса) основан на принципе перевода систематических погрешностей в случайные.

Этот метод позволяет эффективно уменьшать постоянную систематическую погрешность (методическую и инструментальную) путем измерения некоторой величины рядом однотипных приборов с последующей оценкой результата измерений в виде математического ожидания (среднего арифметического значения) выполненного ряда наблюдений.

*Метод введения поправок.* Довольно часто систематические погрешности могут быть вычислены и исключены из результата измерения с помощью поправки. *Поправка*  $C$  — величина, одноименная с измеряемой  $x_u$ , которая вводится в результат измерения  $x = x_u + \Delta_c + C$  с целью исключения систематической погрешности. В случае  $C = -\Delta_c$  систематическая погрешность полностью исключается из результата измерения. Поправки определяются экспериментально или путем специальных теоретических исследований и задаются в виде формул, таблиц или графиков.

Наиболее просто методом введения поправок исключают постоянные инструментальные систематические погрешности, которые обычно выявляют посредством поверки средства измерения. Ввод одной поправки позволяет исключить влияние только одной составляющей систематической погрешности. Для устранения всех составляющих, в результат измерения приходится вводить ряд поправок.

Рассмотрим далее некоторые методы, применяющиеся для обнаружения и уменьшения переменных и монотонно *изменяющихся во времени* систематических погрешностей.

*Метод симметричных наблюдений* весьма эффективен при выявлении и исключении погрешности, являющейся линейной функцией соответствующего аргумента (амплитуды, напряжения, времени, температуры и т. д.).

Предположим, что измеряется величина  $x_u$ , а результаты наблюдений  $x_i$ , зависят от времени  $t$ . Для выявления характера изменения погрешности выполняют несколько наблюдений через равные промежутки времени  $\Delta t$ . Пусть выполнено пять наблюдений  $x_1 \dots x_5$  в моменты времени  $t_1 \dots t_5$ . Далее вычисляют средние арифметические значения двух пар наблюдений  $(x_1 + x_5)/2$  и  $(x_2 + x_4)/2$ . Наблюдения в этих парах проведены в моменты  $t_1, t_5$  и  $t_2, t_4$ , симметричные относительно момента  $t_3$ . При линейном характере изменения погрешности, полученные средние значения должны быть одинаковы. Убедившись в этом, результаты наблюдений можно записать в



виде  $x_i = x_u + kt_i$ , где  $k$  — некоторая постоянная. Пусть  $x_1 = x_u + kt_1$  и  $x_2 = x_u + kt_2$ . Решение системы этих уравнений дает значение  $x_u$ , свободное от переменной систематической погрешности:  $x_u = (x_2 t_1 - x_1 t_2) / (t_2 - t_1)$ . Подобным образом удастся исключить погрешности, обусловленные, например, постепенным падением уровня напряжения источника питания (аккумулятора, батареи).

*Метод анализа знаков неисправленных случайных погрешностей.* Когда знаки неисправленных случайных погрешностей чередуются с некоторой закономерностью, имеет место переменная систематическая погрешность. Если у случайных погрешностей последовательность знаков «+» сменяется последовательностью знаков «-» или наоборот, то присутствует монотонно изменяющаяся систематическая погрешность. Если же у случайных погрешностей группы знаков «+» и «-» чередуются, то имеет место периодическая систематическая погрешность.

*Графический метод* является наиболее простым для обнаружения переменной систематической погрешности в ряде результатов наблюдений. При этом методе рекомендуется построить график, на который нанесены результаты наблюдений в той последовательности, в какой они были получены. На графике через точки наблюдений проводят плавную линию, которая выражает тенденцию результата измерения, если она существует. Если тенденция не прослеживается, то переменную систематическую погрешность считают практически отсутствующей.

В заключение отметим, что при измерениях всегда остаются *неисключенные остатки систематических погрешностей* (НСП).

### 2.1.2. Случайная погрешность

Методы теории вероятностей и математической статистики позволяют установить вероятностные (статистические) закономерности появления случайных

погрешностей и на основании этих закономерностей дать количественные оценки результата измерений и его случайной погрешности. Для характеристики свойств случайной величины в теории вероятностей используют понятие закона распределения вероятностей случайной величины [3, 13].

### **2.1.2.1. Законы распределения и основные характеристики случайной величины**

Различают две формы описания закона распределения: интегральную и дифференциальную. В метрологии преимущественно используется дифференциальная форма закона распределения плотности вероятностей случайной величины.

Если известен дифференциальный закон распределения случайной величины, то вероятность  $P$  её попадания в интервал от  $x_1$  до  $x_2$

$$P(x_1 < x < x_2) = \int_{x_1}^{x_2} f(x) dx .$$

Графически эта вероятность выражается отношением площади, лежащей под кривой  $f(x)$  в интервале от  $x_1$  до  $x_2$  к общей площади, ограниченной кривой распределения.

Кроме непрерывных случайных величин в метрологической практике встречаются и дискретные случайные величины. Для описания свойств случайной величины используют числовые характеристики распределений. В качестве числовых характеристик выступают моменты случайных величин: начальные и центральные. Все они представляют собой некоторые средние значения; причём, если усредняются величины, отсчитываемые от начала координат, моменты называются начальными, а если от центра распределения—центральными.

Начальный момент  $K$ -го порядка определяется формулами:

$$m_k = \int_{-\infty}^{\infty} x^k \cdot f(x) dx,$$

$$m_k = \sum_{i=1}^n x^k \cdot p_i.$$

где  $p_i$  – вероятность появления дискретной величины. Первая формула относится к непрерывным, а вторая к дискретным случайным величинам.

Наибольший интерес для анализа представляет **математическое ожидание** случайной величины ( $k = 1$ )

$$m_k = \int_{-\infty}^{\infty} x^k \cdot f(x) dx \quad m_k = \sum_{i=1}^n x^k \cdot p_i.$$

Центральные моменты  $k$ -го порядка рассчитываются по формулам

$$m_k = \int_{-\infty}^{\infty} (x_i - a)^k f(x) dx; \quad m_k = \sum_{i=1}^N (x_i - a)^k \cdot p_i.$$

Из центральных моментов особенно важную роль играет второй момент ( $k = 2$ ), т.е. **дисперсия** случайной величины.

$$m_k = \int_{-\infty}^{\infty} (x - a)^2 \cdot f(x) dx,$$

$$m_k = \sum_{i=1}^n (x_i - a)^2 \cdot p_i.$$

Дисперсия случайной величины характеризует рассеяние отдельных её значений; размерность дисперсии — квадрат случайной величины. Часто в качестве характеристики рассеяния случайной величины принимают корень квадратный из дисперсии, называемым **средним квадратическим**

отклонением (СКО), которое имеет размерность случайной величины.

К оценкам, получаемым по статистическим данным, предъявляются требования состоятельности, несмещенности и эффективности.

Оценка считается **состоятельной**, если при увеличении числа наблюдений она стремится к истинному значению оцениваемой величины.

**Несмещенной** считается оценка, математическое ожидание которой равно истинному значению оцениваемой величины.

**Эффективность** оценки определяется величиной дисперсии. Чем меньше дисперсия, тем эффективнее оценка.

В практике измерений встречаются различные формы кривой закона распределения, однако чаще всего имеют дело с *нормальным* и *равномерным распределениями плотности вероятностей*. Правила обработки результатов наблюдений, как правило, регламентируются нормативно-техническими документами (стандартами, методическими указаниями, инструкциями). Так в стандарте на методы обработки результатов прямых измерений с многократными повторениями наблюдений указывается, что приведенные в нем методы обработки установлены для результатов наблюдений, принадлежащих нормальному закону.

**Нормальное распределение плотности вероятностей** характерно тем, что согласно центральной предельной теореме теории вероятностей, такое распределение обусловлено влиянием бесконечно большого числа бесконечно малых случайных возмущений с любыми распределениями. Применительно к измерениям это означает, что нормальное распределение случайных погрешностей возникает тогда, когда на результат измерения действует множество случайных возмущений, ни одно из которых не является преобладающим.

В аналитической форме нормальный закон распределения выражается формулой

$$f(x) = \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} e^{\left[ \frac{-(x-a)^2}{2 \cdot \sigma^2} \right]}.$$

где  $x$  - случайная величина;  $a$  - математическое ожидание случайной величины;  $\sigma$  - среднее квадратическое отклонение (СКО).

Перенеся начало координат в центр распределения  $a$  и откладывая по оси абсцисс погрешность,  $\Delta x = x - a$ , получим кривую нормального распределения погрешностей (рис. 2.2)

$$f(x) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2 \cdot \pi}} e^{-\frac{(\Delta x)^2}{2 \cdot \sigma^2}}.$$

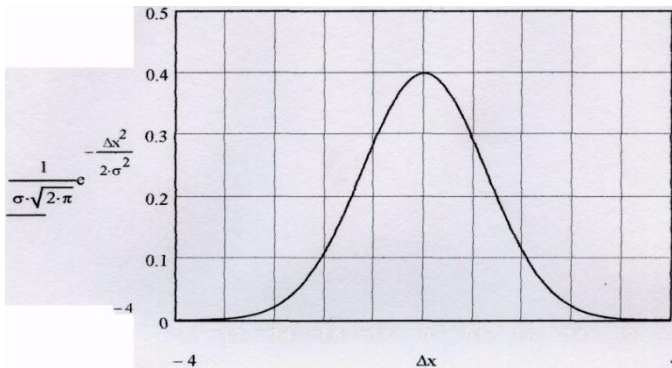


Рис. 2.2. Кривая нормального распределения погрешностей

Для группы из  $n$  наблюдений, распределенных по нормальному закону

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - a)^2}{n - 1}}; \quad a = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n x_i.$$

Кривая нормального распределения погрешностей симметрична относительно оси ординат. Это означает, что в массе своей погрешности имеют примерно одинаковое количество отклонений, как в отрицательную, так и в положительную сторону. Из характера кривой следует, что малые погрешности встречаются чаще, чем большие.

Сравнивая между собой кривые нормального распределения с различными СКО, можно убедиться, что чем меньше СКО тем меньше рассеяние результатов измерений и тем больше вероятность того, что доля малых отклонений больше, чем больших. Естественно заключить, что качество измерений тем выше, чем меньше СКО случайных погрешностей.

Случайная величина  $x$  может принимать одни и те же значения в пределах некоторого конечного интервала от  $x_1$  до  $x_2$  с постоянной плотностью вероятностей. Такое распределение называется равномерным и описывается соотношениями:

$$f(x) = cx_1 < x < x_2;$$

$$f(x) = cx < x_1; x < x_2.$$

Так как площадь, ограниченная кривой распределения равна единице, то

$$c \cdot (x_2 - x_1) = 1;$$

$$c = \frac{1}{x_2 - x_1}.$$

Отсюда плотность распределения

$$f(x) = \frac{1}{x_2 - x_1} \quad \text{при } x_1 < x < x_2;$$

$$f(x) = c \quad \text{при } x < x_1; x < x_2.$$

Математическое ожидание величины  $x$  -  $a = \frac{x_1 + x_2}{2}$ .

В силу симметрии равномерного распределения медиана величины  $x$  также равна  $\frac{x_1 + x_2}{2}$ . Моды закон равномерной плотности не имеет.

Определения медианы и моды:

**Медиана** – центр симметрии распределения. Для нормального распределения совпадает с математическим ожиданием. Мода – координата максимума плотности распределения. Для нормального закона распределения также совпадает с математическим ожиданием. Дисперсия величины  $x$  определяется по формуле:

$$D_x = \frac{(x_2 - x_1)^2}{12},$$

откуда СКО  $\sigma = \frac{x_2 - x_1}{2\sqrt{3}}$  (математическим ожиданием).

Дисперсия величины  $x$  определяется по формуле:  $D_x = \frac{(x_2 - x_1)^2}{12}$ ,

откуда СКО  $\sigma = \frac{x_2 - x_1}{2\sqrt{3}}$ .

### 2.1.2.2. Варианты оценки случайных погрешностей

Для количественной оценки случайных погрешностей и установления границ случайной погрешности результата измерений используются: предельная погрешность; интервальная оценка; числовые характеристики закона распределения. Выбор конкретной оценки определяется степенью полноты сведений о погрешности, назначением измерений и характером использования их результатов. Комплексы оценок показателей точности установлены стандартами.

**Предельная погрешность**  $\Delta_m$  - погрешность, больше которой в данном измерительном эксперименте не может появиться. Такая оценка погрешности правомерна только для распределений, границы которых четко выражены и существует такое значение  $\pm\Delta_m$ , которое ограничивает возможные значения случайных погрешностей с обеих сторон от центра распределения (например, равномерное).

На практике такая оценка есть указание наибольшей погрешности, которая может встретиться при многократных измерениях одной и той же величины. Недостатком такой оценки является то, что она не содержит информации о характере закона распределения случайных погрешностей. При арифметическом суммировании предельных погрешностей получаемая сумма может значительно превышать действительные погрешности.

Более универсальными и информативными являются **квантильные оценки**. Площадь, заключенная под всей кривой плотности распределения погрешностей, отражает вероятность всех возможных значений погрешности и по условиям нормирования равна единице. Квантильная оценка погрешности представляется интервалом от  $-\Delta x(P)$  до  $\Delta x(P)$ , на котором с заданной вероятностью  $P$  встречаются  $P \times 100\%$  всех возможных значений случайной погрешности.

Интервал с границами  $\pm\Delta x(p)$  называется **доверительным интервалом** случайной погрешности, а соответствующая ему вероятность – **доверительной вероятностью**.

Доверительные границы случайной погрешности  $\pm\Delta x(P)$ , соответствующие доверительной вероятности  $P$ , находят по формуле  $\Delta x(P) = t \cdot \sigma$ , где  $t$  - коэффициент, зависящий от  $P$  и вида закона распределения.

$t \times \sigma$	$1 \times \sigma$	$2 \times \sigma$	$3 \times \sigma$	$4 \times \sigma$
<b>P</b>	0,68	0,95	0,997	0,999



В таблице приведены доверительные вероятности и соответствующие им доверительные интервалы. При нормальном распределении погрешностей принято считать случайную погрешность с границами  $\pm 3\sigma$  *предельной (максимально возможной) погрешностью*. Погрешности, выходящие за эти границы, классифицируются как грубые или промахи.

Оценка  $\sigma$  рассеяния единичных результатов наблюдений в группе наблюдений относительно среднего их значения, а вычисляется по формуле

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - a)^2}{n - 1}}.$$

Поскольку число наблюдений в группе ограничено, то повторив заново серию наблюдений этой же величины, мы получили бы новое значение среднего арифметического. Повторив многократно серии наблюдений и, вычисляя каждый раз их среднее арифметическое значение, мы убедимся в рассеянии средних арифметических значений. Характеристикой этого рассеяния является **среднее квадратическое отклонение среднего арифметического**

$$S_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - a)^2}{n(n-1)}} = \frac{S_x}{\sqrt{n}}.$$

СКО  $S_x$  используется для оценки погрешности результата измерений с многократными наблюдениями. При нормальном законе распределения плотности вероятностей результатов наблюдений и небольшом числе наблюдений среднее арифметическое подчиняется закону распределения Стьюдента с тем же средним арифметическим значением  $a$ .

Особенностью этого распределения является то, что доверительный интервал с уменьшением числа наблюдений расширяется, по сравнению с нормальным законом распределения при той же доверительной вероятности.

Доверительная граница абсолютной случайной погрешности находится по формуле

$$\Delta x = t \cdot S(X_m),$$

где  $t$  - коэффициент Стьюдента;

$S$  - среднеквадратическое отклонение результата измерения при  $m$  - наблюдениях.

СКО  $S_x$  используется для оценки погрешности результата измерений многократными наблюдениями.

При нормальном законе распределения плотности вероятностей результатов наблюдений и небольшом числе наблюдений среднее арифметическое подчиняется закону распределения Стьюдента с тем же средним арифметическим значением  $a$ . Особенностью этого распределения является то, что доверительный интервал с уменьшением числа наблюдений расширяется, по сравнению с нормальным законом распределения при той же доверительной вероятности.

**Обработка результатов наблюдений производится в следующей последовательности:**

1. Исключить известные систематические погрешности из результатов наблюдений (введением поправки);
2. Вычислить среднее арифметическое исправленных результатов наблюдений, принимаемое за результат измерения:

$$X = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n x_i .$$

4. Вычислить оценку среднего квадратического отклонения результатов наблюдения:

$$\sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(x_i - \bar{x})^2}{n-1}}.$$

Вычислив оценку СКО результата наблюдений, целесообразно проверить наличие в группе наблюдений грубых погрешностей, помня, что при нормальном законе распределения ни одна случайная погрешность  $(X_i - \bar{X})$ , с вероятностью практически равной единице, не может выйти за пределы  $\pm 3\sigma$ . Наблюдения, содержащие грубые погрешности, исключают из группы и заново повторяют вычисления  $\bar{X}$  и  $\sigma$ .

4. Вычислить оценку СКО результата измерения  $S_x$  по формуле для  $S_x$ .

5. Проверить гипотезу о том, что результаты наблюдений принадлежат нормальному распределению. Приблизительно о характере распределения можно судить, построив гистограмму. Строгие методы проверки гипотез с применением специальных критериев ( $\chi^2$ -Пирсона,  $\omega^2$ -Мизеса-Смирнова и др.) рассматриваются в специальных дисциплинах.

При числе наблюдений  $n < 15$  принадлежность их к нормальному распределению не проверяют, а доверительные границы случайной погрешности результата определяют лишь в том случае, если достоверно известно, что результаты наблюдений принадлежат нормальному закону.

6. Вычислить доверительные границы  $\varepsilon$  случайной погрешности результата измерения при заданной вероятности  $P$ :

$$\varepsilon = t_q \cdot S_x,$$

где  $t_q$  - коэффициент Стьюдента.

7. Вычислить границы суммарной неисклученной систематической погрешности результата измерений. При

отсутствии данных о виде распределения неисключенных составляющих систематических погрешностей их распределения принимают за равномерные. При равномерном распределении неисключенной систематической погрешности результата измерения  $\theta$  вычисляют по формуле

$$\theta = \kappa \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^m (\theta_i)^2},$$

где  $\theta_i$  - граница  $i$ -й неисключенной составляющей систематической погрешности;

$\kappa$  - коэффициент, определяемый принятой доверительной вероятностью (при  $P=0,95$   $\kappa=1,1$ );

$m$  - количество неисключенных составляющих.

8. Вычислить доверительные границы погрешности результата измерения. Анализ соотношения между неисключенной систематической погрешностью и случайной

показывает, что если  $\frac{\Theta}{S_x} \leq 0,8$ , то неисключенной

погрешностью можно пренебречь и принять границы погрешности результата  $\Delta$  равным  $\pm \varepsilon$ . Если  $\frac{\Theta}{S_x} > 0,8$ , то

случайной погрешностью нельзя пренебречь и принять границы погрешности результата  $\Delta$  равным  $\pm \theta$ . Если оба неравенства не выполняются, вычисляется СКО результата как сумма неисключенных систематических погрешностей и случайной составляющей:

$$S_{\Sigma} = \sqrt{\sum_{i=1}^m \frac{(\theta_i)^2}{3} + (S_x)^2}.$$

Границы погрешности результата измерения в этом случае вычисляют по формуле

$$K = \frac{\varepsilon + \theta}{S_x + \sqrt{\sum_{i=1}^m \frac{(\theta_i)^2}{3}}}$$

Стандартом регламентирована и форма записи результатов измерений. При симметричном доверительном интервале погрешности результат измерения представляют в форме  $X \pm \Delta$ ,  $P$ , где  $X$  - результат измерения.

При отсутствии данных о видах функции распределения составляющих погрешности результата или при необходимости дальнейшей обработки результатов, результат измерения представляют в форме  $X$ ,  $S_x$ ,  $n$ ,  $\theta$ .

## 2.2. Правила и формы представления результатов измерений

Любая измерительная информация — результаты и погрешности измерений, эмпирические зависимости и т.д. — должна сопровождаться показателями точности измерений. В целях единообразия отражения результатов и погрешностей измерений необходимо применять однотипные показатели точности измерений и формы представления результатов измерений.

Соответствующим стандартом установлено, что в численных показателях точности измерений (в том числе и в погрешности) должно быть не более двух значащих цифр. Так, при записи наименьшие разряды числовых значений результата измерения и численных показателей точности должны быть одинаковы. В приведенном примере оценка погрешности должна быть записана как 0,43 или 0,4, а результат измерения — 12,72 или 12,7 соответственно. Расчет погрешностей округления погрешности измерения показывает, что при округлении до двух значащих цифр она составляет не более 5 %, а при округлении до одной значащей цифры — не более

50 %. При этом характеристики погрешности оценивают приближенно; точность оценок согласовывается с целью измерения.

В практической метрологии выработаны следующие правила округления результатов и погрешностей измерений.

1. Результат измерения округляется до того же десятичного знака, которым оканчивается округленное значение абсолютной погрешности. Лишние цифры в целых числах заменяются нулями. Если десятичная дробь в числовом значении результата измерений оканчивается нулями, то нули отбрасываются до того разряда, который соответствует разряду числового значения погрешности.

*Пример 2.1.* Результат 4.0800, погрешность 0,001; результат округляют до 4,080.

2. Если цифра старшего из отбрасываемых разрядов меньше 5, то остальные цифры числа не изменяются. Лишние цифры в целых числах заменяются нулями, а в десятичных дробях отбрасываются.

*Пример 2.2.* Число 174437 при сохранении четырех значащих цифр должно быть округлено до 174400. число 174,437 до 174,4.

3. Если цифра старшего из отбрасываемых разрядов больше или равна 5, но за ней следуют отличные от нуля цифры, то последнюю сохраняемую цифру увеличивают на единицу.

*Пример 2.3.* При сохранении трех значащих цифр число 12567 округляют до 12600, число 125,67 до 126.

4. Если отбрасываемая цифра равна 5, а следующие за ней цифры неизвестны или нули, то последнюю сохраняемую цифру не изменяют, если она четная, и увеличивают на единицу, если она нечетная.

*Пример 2.4.* Число 232,5 при сохранении двух значащих цифр округляют до 232, а число 233,5 до 234.

5. Погрешность результата измерения указывается *двумя* значащими цифрами, если первая из них равна 1 или 2, и *одной* — если первая цифра равна 3 или более.

6. Округление производят лишь в окончательном ответе, а все предварительные вычисления проводят с одним-двумя лишними знаками.

Если руководствоваться этими правилами округления, то количество значащих цифр в числовом значении результата измерений дает возможность ориентировочно судить о точности измерения. Это связано с тем, что предельная погрешность, обусловленная округлением, равна половине единицы последнего разряда числового значения результата измерения.

### **2.3. Метрологические характеристики средств измерения**

Для обеспечения единства измерений и взаимозаменяемости средств измерений их метрологические характеристики нормируются и регламентируются. Для этого используют *нормированные значения погрешности*. Под нормированным значением понимается погрешность, являющаяся *предельной* для данного типа средств измерения. Правила предписания пределов допускаемых погрешностей и форма их записи устанавливаются системой стандартов, обеспечивающей единство измерений.

К метрологическим характеристикам средств измерений относятся те, которые оказывают влияние на результаты и погрешности измерений. Среди них можно выделить несколько основных:

- градуировочные характеристики, определяющие зависимость выходного сигнала от входного; номинальное значение меры; пределы измерения; цена деления шкалы для аналоговых приборов; вид и параметры цифрового кода цифровых приборов;

- динамические характеристики, отражающие инерционные свойства средств измерений и необходимые для оценивания динамических погрешностей измерений;
- инструментальные составляющие погрешности измерения;
- функции влияния, отражающие зависимость метрологических характеристик средств измерений от воздействия влияющих величин или их информативных параметров (напряжение, частота сети и т. д.).

Метрологические характеристики нормируются для нормальных условий применения средств измерений. *Нормальными* считаются такие условия, при которых изменением метрологических характеристик под воздействием влияющих величин можно пренебречь.

Для многих типов средств измерений нормальными условиями применения являются: температура окружающей среды ( $20 \pm 10$ )° С; напряжение питающей сети ( $220 \pm 4,4$ ) В; частота сети ( $50 \pm 0,5$ ) Гц. Одной из важнейших метрологических характеристик является *погрешность средств измерения* — *инструментальная* погрешность (точность) измерения ими физической величины.

Информация о возможной инструментальной составляющей погрешности измерения необходима и содержится в указании класса точности средства измерения.

В Рекомендации по межгосударственной стандартизации ПМГ 29-99 «ГСИ. Метрология. Основные термины и определения» (аналогично в ГОСТе) дается следующее определение класса точности: «*Класс точности* средства измерения — обобщенная характеристика средства измерения, определяемая пределами допускаемых основных и дополнительных погрешностей, а также другими свойствами средств измерений, влияющими на точность, значения которых устанавливаются в стандартах на отдельные виды средств измерений». Имеется и такое примечание: «Класс точности средств измерений характеризует их свойства в отношении точности, но не является непосредственным показателем точности



измерений, выполненных с помощью этих средств». Последнее связано с тем, что погрешность зависит еще от ряда факторов: метода измерений, условий измерений и т.д. Класс точности лишь позволяет судить о том, в каких пределах находится погрешность средства измерения данного типа.

Классы точности присваивают средствам измерений при их разработке на основании исследований и испытаний представительной партии устройств данного типа. Обычно они устанавливаются в стандартах или технических условиях на средства измерений. При этом пределы допускаемых погрешностей нормируют и выражают в форме *абсолютной* ( $\Delta_{\text{си}} = \Delta$ ), *относительной* ( $\delta_{\text{си}} = \delta$ ) или *приведенной* ( $\gamma_{\text{си}} = \gamma$ ) *погрешностей* (далее индекс «си» для упрощения опущен). Форма выражения зависит от характера изменения погрешностей в пределах диапазона измерений, а также от условий применения и конкретного назначения средства измерения.

В общем случае абсолютная погрешность средств измерений  $\Delta_{\text{си}} = \Delta$  состоит из *аддитивной* (суммируемой с измеряемой величиной) и *мультипликативной* (умножаемой на измеряемую величину) составляющих. Причиной возникновения аддитивной составляющей погрешности могут быть: неточность установки на нуль перед измерением, наличие термоЭДС в цепях постоянного тока и т.д. Для устранения таких погрешностей во многих измерительных приборах предусмотрено механическое или электронное устройство для установки нуля шкалы или цифрового индикатора (корректор нуля). Причинами возникновения мультипликативной погрешности могут быть изменения коэффициента усиления усилителя, коэффициента передачи измерительного преобразователя и т.д.

### 2.3.1. Пределы допускаемой основной погрешности средства измерения

Максимальная основная погрешность измерительного прибора (средства измерения), при которой он разрешен к применению, называется *пределом допускаемой основной погрешности*.

*Пределы допускаемой абсолютной основной погрешности* устанавливают с одной из формул:

$$\Delta = \pm a, \quad (2.2)$$

$$\Delta = \pm (a + bx), \quad (2.3)$$

где  $x$  — значение измеряемой величины;  $a, b$  — положительные числа, не зависящие от  $x$ .

Первая формула описывает аддитивную погрешность (рис. 2.3, *а*) средств измерений. Нормирование в соответствии с выражением (2.3) означает, что в составе погрешности средства измерения присутствует сумма аддитивной и мультипликативной (мультипликативная погрешность показала на рис. 2.3, *б*) составляющих (рис. 2.3, *в*). Например, для генератора елкой частоты ГЗ-36:  $\Delta = \pm (0,03f + 2)$  Гц.

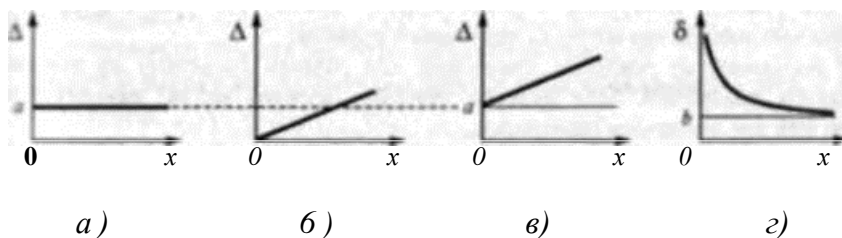


Рис. 2.3. Виды погрешностей средств измерений:  
*а* – аддитивная, *б* – мультипликативная. *в* – сумма аддитивной и мультипликативной, *г* – относительная суммарная

При проведении измерений важное значение имеет *диапазон измерений* средства измерения (измерительного

прибора), что хорошо видно на графике относительной суммарной погрешности  $\delta$  (см. рис. 2.3, з).

При уменьшении «меряемой величины  $x$  относительная погрешность средства измерения  $\delta$  увеличивается и изменяется по гиперболе. Поэтому *следует выбирать такой диапазон измерений, в котором значение  $x$  близко к  $X_k$* , — большему (по модулю) из пределов измерений.

Отметим, что рассмотренные выше выражения и графики для абсолютной  $\Delta$  и относительной  $\delta$  погрешностей средства измерения получены для  $\Delta > 0$ . Однако в практике измерений вполне возможно получение значения  $\Delta < 0$ . Поэтому в общем случае выражения для абсолютной и относительной погрешностей средства измерения аналитически записываются со знаком « $\pm$ ».

В формулах (2.2) и (2.3) значения  $\Delta$  и  $x$  выражаются одновременно либо в единицах измеряемой или воспроизводимой мерой величины, либо в делениях шкалы средства измерения. В этих случаях класс точности обозначается заглавными буквами латинского алфавита (например, L, M, C и т. д.), или римскими цифрами (I, II, III и т. д.), к буквам при этом допускается присоединять индексы в виде арабской цифры. Чем меньше пределы допускаемой погрешности, тем ближе к началу алфавита должна быть буква и тем меньше цифра

*Пределы допускаемой приведенной основной погрешности* устанавливают по формуле:

$$\gamma = \frac{\Delta}{X_N} 100 \% = \pm p. \quad (2.4)$$

Здесь  $X_N$  — нормирующее значение, выраженное в тех же единицах, что и абсолютная погрешность  $\Delta$ ;  $p$  — отвлеченное положительное число, выбираемое из ряда предпочтительных чисел:

$$1 \cdot 10^n; 1,5 \cdot 10^n; 2 \cdot 10^n; 2,5 \cdot 10^n; 4 \cdot 10^n; 5 \cdot 10^n; 6 \cdot 10^n, \quad (2.5)$$

где  $n = 1, 0, -1, -2$  и т. д.

Для средств измерений с равномерной, практически равномерной или степенной шкалой значение  $X_N$  принимают равным:

- большему из пределов измерений или равным большему из модулей пределов измерений, если нулевое значение (нулевая метка) находится на краю или вне диапазона измерений;

- сумме модулей пределов измерений, если нулевое значение находится внутри диапазона измерения.

*Пределы допускаемой относительной основной погрешности* устанавливают следующим образом:

$$\delta = \frac{\Delta}{X} 100 \% = \pm q, \quad (2.6)$$

если погрешность задана формулой (2.2), т.е.  $\Delta = \pm a$ . Здесь  $q$  — отвлеченное положительное число, выбираемое из ряда предпочтительных чисел (2.5). Когда допускаемая абсолютная основная погрешность задана формулой (2.3), *пределы допускаемой относительной основной погрешности*:

$$\delta = \frac{\Delta}{X} 100\% = \pm \left[ c + d \left( \left| \frac{X_k}{X} \right| - 1 \right) \right], \quad (2.7)$$

где  $c$  — суммарная относительная погрешность прибора;  $d$  — аддитивная относительная погрешность прибора;  $X_k$  — конечное значение диапазона измерений;  $c, d$  — отвлеченные положительные числа, выбираемые из ряда предпочтительных чисел, приведенных в (2.5).

Числа  $a, b, c, d$  в (2.3) и (2.7) связаны между собой следующим образом:

$$c = b + d; \quad d = \frac{a}{|X_k|}, \quad \text{причем всегда } c > d.$$

Классы точности измерительных приборов, пределы допускаемой относительной основной погрешности которых принято выражать в виде дольного значения предела допускаемой основной погрешности, т.е. по формуле (2.7), обозначают числами  $c$  и  $d$  (в процентах), разделяя их косой чертой (например, 0,05/0,02).

1. Технические характеристики средств измерения (указываются в паспорте).

2. Метрологические характеристики. Эти характеристики влияют на точность результатов измерения.

3. Не метрологические характеристики косвенно влияют на точность результатов измерения. (Например, надежность – свойство прибора сохранять свои характеристики в течение заданного времени при заданных условиях эксплуатации.).

4. Вспомогательные характеристики: масса, габариты.

### **2.3.2. Виды метрологических характеристик средств измерения**

Существует четыре вида метрологических характеристик средств измерения:

1. Метрологические характеристики в статическом режиме.

2. Метрологические характеристики в динамическом режиме.

3. Нормирование метрологических характеристик.

4. Взаимосвязь точности, быстродействия, потребляемой мощности с точки зрения информационно-энергетической теории измерительных устройств.

Рассмотрим более подробно каждый из этих видов.

### 2.3.1.1. Метрологические характеристики в статическом режиме

Отличительная особенность статического режима: измеряемая величина постоянна и все переходные процессы закончены [16].

Основное свойство функции преобразования – однозначность СИ – средство измерения.  $y=F(x)$  – однозначная функция (рис. 2.4).

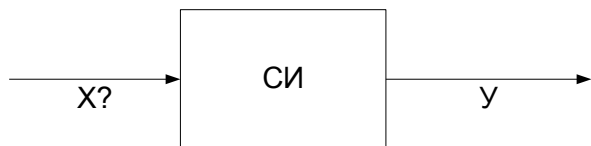


Рис. 2.4. Свойство функции преобразования

Функция преобразования может быть линейной или нелинейной.

### 2.3.1.2. Метрологические характеристики в динамическом режиме

Динамический режим (рис. 2.5) возникает, если:

1. Изменяемая величина изменяется со временем.
2. Меняется нагрузка.
3. Меняются влияющие факторы.

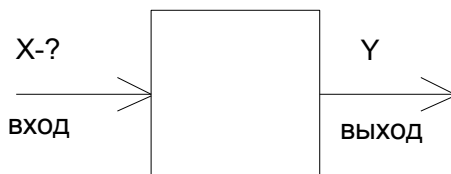


Рис. 2.5. Динамический режим

Следовательно, при динамическом режиме возникают два условия:

- 1) появляется запаздывание сигнала;
- 2) появляется искажение сигнала.

Чтобы найти полные динамические характеристики нужно решить уравнение вида:

$$\sum_{j=1}^m A_j \cdot \frac{d^j}{dt^j} y = \sum_{i=1}^n B_i \cdot \frac{d^i}{dt^i} x$$

где А и В – параметры сигнала и внутренние параметры устройства.

Если не нужно описывать полные динамические характеристики, то можно использовать уравнения вида:

$$\frac{d^2 y}{dt^2} + 2\beta \frac{dy}{d\tau} + y = F(x),$$

где  $\tau = t\omega_0$ ;  $\omega_0$  - собственная частота;

$\beta$  - коэффициент или степень успокоения.

Динамика определяется при конкретном виде входного воздействия.

Виды динамических характеристик:

1. Полные – полностью определяют поведение.
2. Частичные – определяют одну характеристику.

**Полные характеристики** характеризуются следующими параметрами:

1. Переходная характеристика (рис. 2.6)

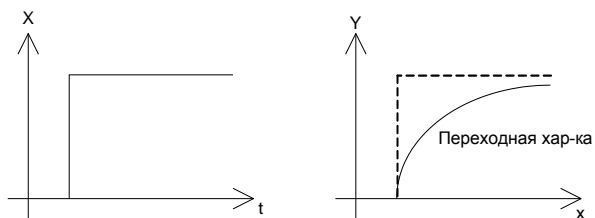


Рис. 2.6. Переходная характеристика

2. Импульсная характеристика (рис. 2.7)

$$G(S) = \frac{Y(S)}{X(S)} \text{ при нулевых начальных условиях (ННУ).}$$

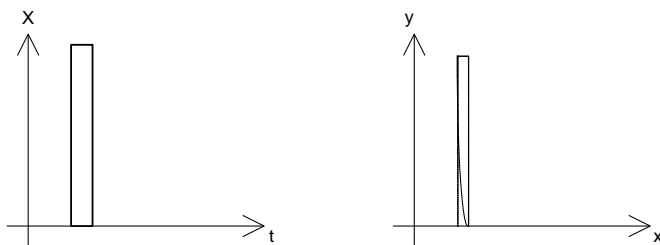


Рис. 2.7. Импульсная характеристика

3. Амплитудно-фазовая характеристика (АФХ) (рис. 2.8)

$$G(j\omega) = \frac{Y(j\omega)}{X(j\omega)} \text{ при ННУ АФХ - АЧХ и ФЧХ}$$

(характеризует запаздывание).

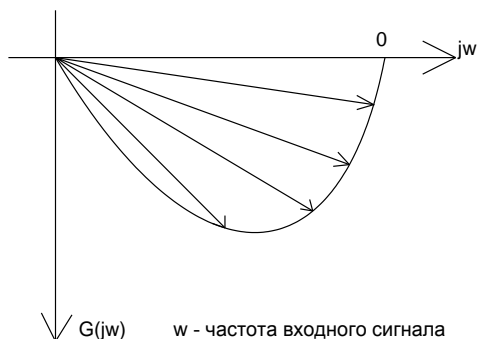


Рис. 2.8. Амплитудно-фазовая характеристика



Рассмотрим пример динамического режима (рис. 2.9).

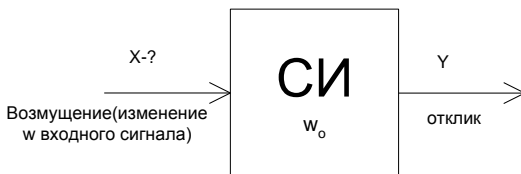


Рис. 2.9. Пример динамического режима

В результате, получим один из трех видов изменения входного сигнала:

1.  $\omega = \omega_0$  резонанс;
2.  $\omega \leq \omega_0$  ;
3.  $\omega \geq \omega_0$  - возможно искажение.

Пусть динамика описывается следующим уравнением:

$$\frac{d^2 y}{d\tau^2} + 2\beta \frac{dy}{d\tau} + y = \sin \rho\tau$$

где  $\rho = \frac{\omega}{\omega_0}$  - соотношение частот;  $\tau = \omega_0 t$  ;

$\beta$  - степень успокоения.

Таким образом, возможно появление одного из условий:

- а) будет ли запаздывание;
- б) будет ли искажение.

Тогда:

$$y = Y_{\text{общ}} + Y_{\text{частн}} \cdot$$

$Y_{\text{общ}}$  зависит от  $\beta$  , но не дает ответ на появление одного из условий. Рассмотрим амплитудно-частотную характеристику динамики (рис. 2.10):

$$Y_{\text{частн}} = x \sin(\rho\tau - \varphi),$$

$$X = \frac{1}{(1-\rho)^2 + 4\beta^2\rho^2} = F^*\left(\frac{\omega}{\omega_0}, \beta\right),$$

$$\varphi = \arctg\left(\frac{2\beta\rho}{1-\rho^2}\right) = F^{**}\left(\frac{\omega}{\omega_0}, \beta\right).$$

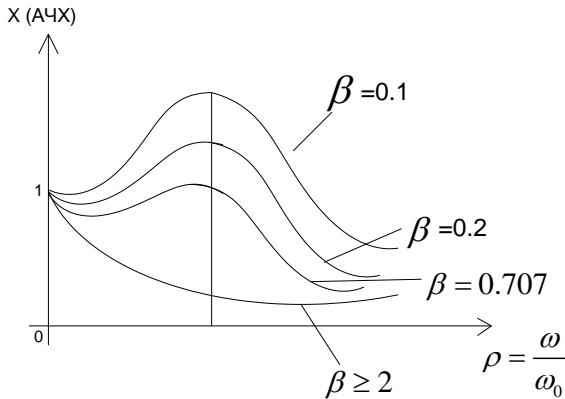


Рис. 2.10. Амплитудно-частотная характеристика

Следовательно, при  $\beta = 0 \Rightarrow \omega = \omega_0$ , а при  $\beta = \infty \Rightarrow \omega > \omega_0$ .

**Частные динамические характеристики** описываются следующими параметрами:

1. собственная частота  $\omega_0$ ;
2. коэффициент успокоения;
3. время установления показаний – промежуток времени от момента изменения измеряемой величины до того момента, когда показания не будут выходить за определенную зону.

Обычно электромеханические приборы имеют время установления показаний меньше, чем 4 с, а цифровые приборы делают  $10^7$  измерений в секунду (рис. 2.11).

Если есть дифференциальное уравнение, то время установления показаний равно бесконечности.

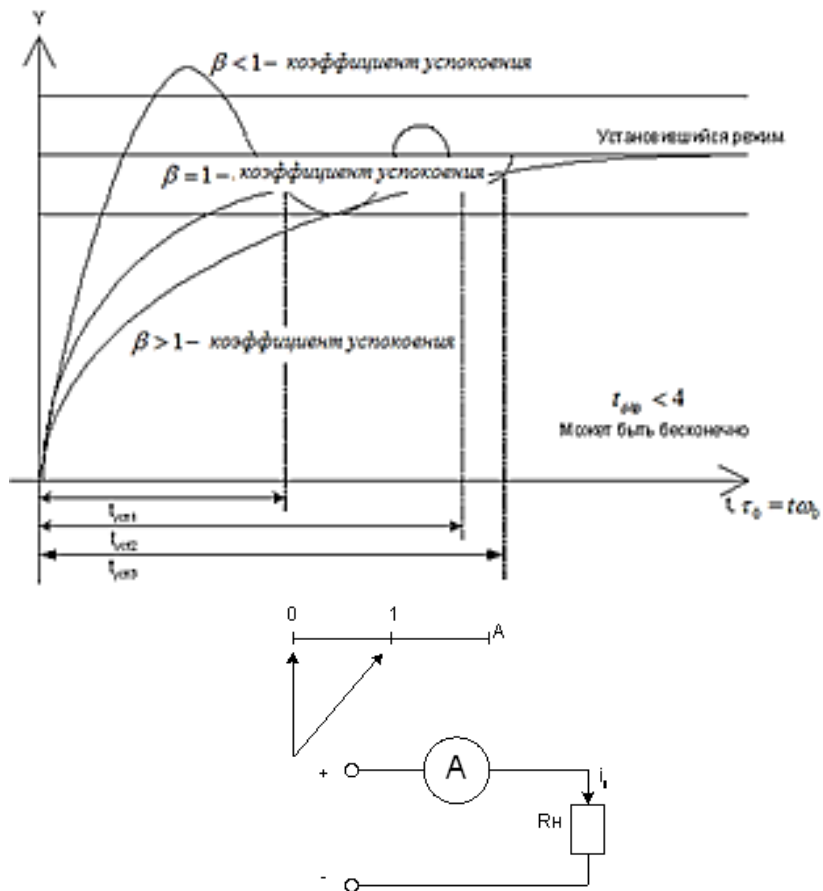


Рис. 2.11. Установление показаний измерительного прибора

Рассмотрим взаимосвязь мощности, быстродействия и точности с точки зрения информационно-энергетической теории измерительных устройств.

Будем принимать процесс передачи информации, как энергетический процесс (рис. 2.12).

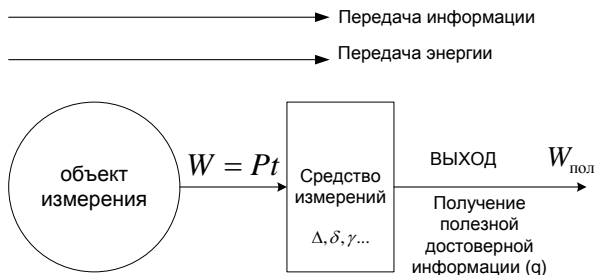


Рис. 2.12. Процесс передачи информации

Для того, чтобы получить на выходе информацию, нужно затратить энергию.  $W_{пол}$  появляется из-за того, что мы от объекта измерений отбираем  $W=Pt$ . Чем больше нужно получить  $W_{пол}$ , тем больше нужно будет забрать  $W=Pt$ .

Количество информации, получаемой при измерении, в зависимости от потребляемой мощности подчиняется второму закону термодинамики и может быть реализовано с КПД не более, чем у тепловых машин.

$$\eta_s = \frac{W_{пол}}{W} = \frac{W_{пол}}{Pt} < 1.$$

Отношение полезной энергии к затраченной много меньше единицы, отсюда следует, что пропадает часть энергии, а это значит, что пропадает часть информации в средстве измерения (так как средство измерения имеет погрешность).

Если средство измерения идеально (гипотетически), то точность измерений принципиально ограничена:

1. дискретностью измеряемой величины;
2. флуктуациями, связанными с принципиальной дискретностью вещества и энергии.

Средство измерения состоит из элементов, имеющих шумы (флуктуаций):

- магнитный;
- тепловой;
- дробовой.

Следовательно, есть энергия шума  $W_{ш}$ . Условия осуществления измерений:  $W = Pt > W_{ш}$ . Но при этом точность ограничена.  $C$  – энергетический порог чувствительности:

$$C = \frac{W_{ш}}{\eta_3} = \gamma^2 Pt, \text{ где } \gamma - \text{погрешность.}$$

Условие осуществления измерения теплового шума: средняя мощность  $P_{ш} = 4\pi k\Theta\Delta f$ ,  $k$  - постоянна Больцмана;  $\Delta f$  - полоса частот;  $\Theta$  - температура, К.

Тепловую мощность и тепловую энергию можно рассчитать при изменяющихся значениях  $T$ ; при  $t = 20^\circ \Rightarrow W_{ш} = 3,5 * 10^{-20}$ .

Таким образом, энергетический порог чувствительности принимает вид:  $C = \frac{W_{ш}}{\eta_3} = \gamma^2 Pt$ .

Учитывая полученные параметры средства измерения, можно сделать следующие выводы:

1. для одновременного улучшения, во всех трех шумовых характеристиках нужно увеличить  $\eta_3$ .

2. если  $\eta_3 = \text{const}$ , то улучшение одной характеристики автоматически ухудшает другую.

3. можно определить, возможное выполнение задания или нет (возможно ли создание всех условий).

### 2.3.2. Нормирование метрологических характеристик

**Норма** – результат соглашения между потребителем и изготовителем.

**Нормирование** – регламентация того факта, каким должен быть прибор.

Происходит нормирование следующих параметров, включающих в себя все характеристики, влияющие на точность полученного результата измерения, а именно:

1. характеристики, с помощью которых определяется результат измерений:

- функции преобразования;
- шкала деления;
- количество разрядов кода;
- единица последнего разряда кода.

2. чувствительность влияющих факторов

3. погрешности

4. характеристики связи средства измерения с объектом и нагрузкой

5. динамические характеристики

6. неинформативные параметры

Нормирование погрешностей бывает двух видов:

I. нормируются вероятностные характеристики погрешности;

II. нормируются предельные значения погрешностей:  $\Delta_{\max}$ ,  $\delta_{\max}$ ,  $\gamma_{\max}$

Рассмотрим нормирование предельного значения погрешности:

1.  $\Delta_{\max}$  :

-  $\Delta_{\max} = \pm a$

-  $\Delta_{\max} = \pm(a + bx)$

2.  $\delta_{\max}$  :

-  $\delta_{\max} = \pm q$

$$- \delta_{\max} = \pm \left( c + d \left| \frac{x_k}{x} - 1 \right| \right), \text{ где } x_k - \text{конечное значение}$$

шкалы,  $x$  - текущее значение шкалы.

$$3. \quad \gamma_{\max} :$$

$$- \gamma_{\max} = \pm p$$

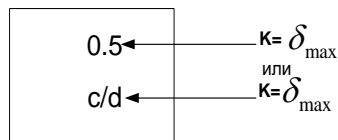
где  $a, b, c, p, q$  - числовые значения.

Для измерительных приборов вводится понятие класс точности – величина, численно равная максимальному значению  $\Delta, \delta, \gamma$ , а так же учитывающая характеристики, влияющие на точность измерений. К - класс точности. Приборы по классу точности можно разделить на три вида:

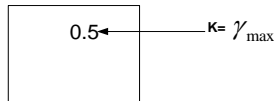
1. приборы, у которых нормируется  $\Delta_{\max}$  :



2. приборы, у которых нормируется  $\delta_{\max}$  :



3. приборы, у которых нормируется  $\gamma_{\max}$  :



Пример расчета нормирования погрешностей показан на рис. 2.13.

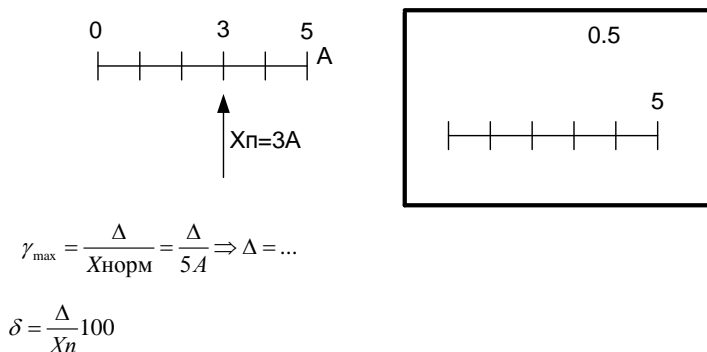


Рис. 2.13. Нормирование погрешностей

## 2.4. Структурные схемы измерения

Рассмотрим классификацию структурных схем измерения:

1. прямого преобразования;
2. компенсационного преобразования;
  - 2.1 с астатической характеристикой;
  - 2.2 со статической характеристикой;
3. с автоматической коррекцией погрешности.

Структурные схемы измерения прямого преобразования показаны на рис. 2.14.



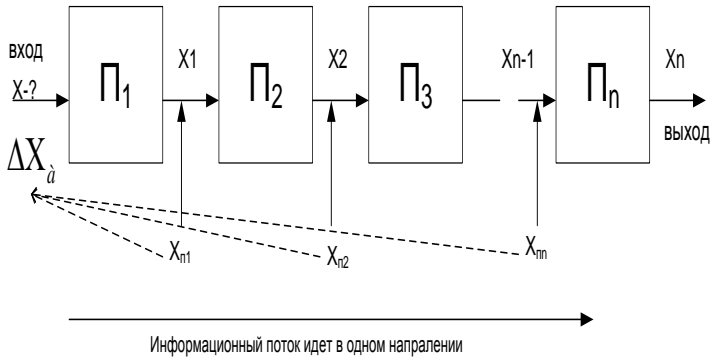


Рис. 2.14. Структурные схемы измерения прямого преобразования

Функции преобразования отдельных блоков могут быть линейными и нелинейными. Пусть все функции линейные:

$$K_1 = \frac{x_1}{x} \quad K_2 = \frac{x_2}{x} \quad \dots \quad K_n = \frac{x_n}{x}$$

а функции преобразования принимают вид:  $X_n = KX_1$ ,  
 где  $K = K_1 * K_2 * \dots * K_n$  (1).

Возникают погрешности:

1.  $\Delta_{\text{м}} \leftarrow K + \Delta K \leftarrow \begin{matrix} \Delta K_1 \pm K_1 \\ \Delta K_2 \pm K_2 \end{matrix} \leftarrow \text{влияние внешних факторов } \xi$

$$\ln(1) = \ln(K) = \ln(K_1) + \ln(K_2) + \dots + \ln(K_n)$$

$$\ln(K_1)' = \frac{1}{K_1} \Rightarrow \frac{\Delta K}{K} = \frac{\Delta K_1}{K_1} + \frac{\Delta K_2}{K_2} + \dots + \frac{\Delta K_n}{K_n}$$

Идеальный случай:  $X_n = KX$  при всех  $\xi$ .

Реальный случай:  $X_n^* = (K + \Delta K)X$  при всех  $\xi$

$$\Delta X_n = X_n^* - X_n$$

$$\Delta X_{\text{м}} = \frac{\Delta X_n}{K} = \frac{\Delta K * X}{K} \Rightarrow$$

При последовательном включении блоков их число ограничено.

Можно подобрать блоки с различным  $\Delta K$ .

2.  $\Delta_a \leftarrow$  внешние помехи и внутренние дрейфы  $\leftarrow X_{п}$

$$\Delta X_a = \frac{X_{n1}}{K_1} + \frac{X_{n2}}{K_1 K_2} + \dots + \frac{X_{nm}}{K_1 K_2 \dots K_n}$$

При наличии помехи, первый каскад нужно делать очень тщательно (экранирование, заземление, использование качественных кабелей). Фильтры не всегда помогают, так как они влияют на динамику.

### 2.4.1. Структурные схемы измерения компенсационного преобразования с астатической характеристикой

Структурные схемы измерения компенсационного преобразования показаны на рис. 2.15.

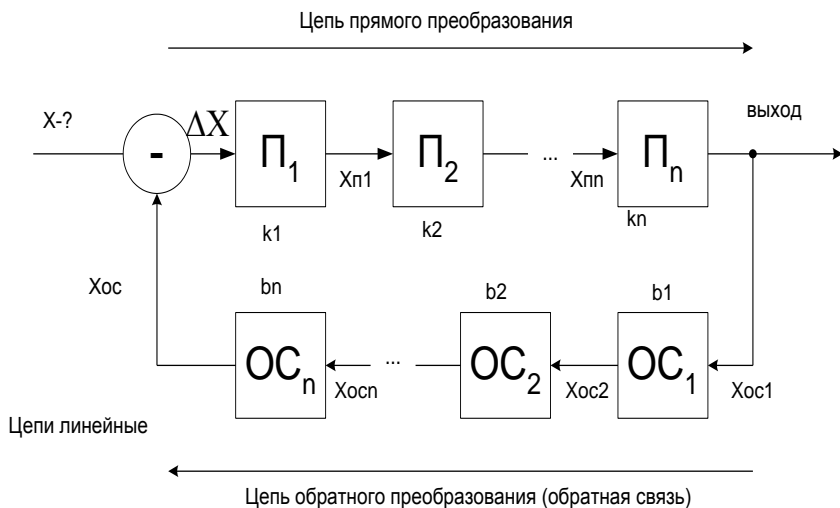


Рис. 2.15. Структурные схемы измерения компенсационного преобразования

Рассмотрим функции преобразования отдельных блоков:

$$\begin{aligned}\Delta X &= X - X_{oc} \\ \Delta X &= 0 \\ \Delta X &= X - X_{oc} = 0 \\ K &= K_1 * K_2 * K_3 * \dots * K_n \\ b &= b_1 * b_2 * b_3 * \dots * b_n\end{aligned}$$

Тогда  $X_{oc} = bX_n \Rightarrow X = bX_n \Rightarrow X_n = \frac{1}{b} X$  - функция преобразования всего устройства,

$S = \frac{1}{b}$  - коэффициент преобразования всего устройства.

Чтобы реализовать такой режим работы, в любом месте цепи прямого преобразования должно стоять запоминающее интегрирующее звено (рис. 2.16).

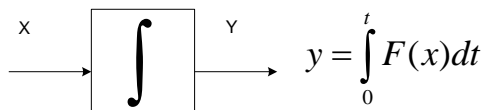


Рис. 2.16. Запоминающее интегрирующее звено

В связи с тем, что современные интегрирующие устройства обладают невысокой чувствительностью, то обычно их ставят в конце цепи.

В такой цепи возникают два вида погрешностей:

1.

$$\Delta X_m \leftarrow S + \Delta S \leftarrow b + \Delta b \leftarrow b_1 + \Delta b_1, b_2 + \Delta b_2, b_3 + \Delta b_3 \dots$$

$$\ln(S) = \ln 1 - \ln b$$

$$\ln S = -\ln b$$

$$\frac{\Delta S}{S} = -\left(\frac{\Delta b_1}{b_1} + \frac{\Delta b_2}{b_2} + \dots + \frac{\Delta b_n}{b_n}\right)$$

Цепь отрицательной обратной связи выполняется на пассивных элементах  $\Rightarrow$  ее можно сделать более стабильной  $\Rightarrow$  введение отрицательной обратной связи всегда уменьшает  $\Delta X_m$ .

2.  $\Delta X_a \leftarrow$  внешние помехи;

внутренние дрейфы;

порог чувствительности интегратора.

Будем считать, что помехи воздействуют на цепь прямого преобразования, так как цепь обратной связи низкоомная. Приведем помехи на вход:

$$\Delta X_a = \frac{X_{n1}}{K_1} + \frac{X_{n2}}{K_1 K_2} + \dots + \frac{X_{nm}}{K_1 K_2 \dots K_n} + \frac{X_{\text{порог}}}{K_1 K_2 \dots K_{n-1}}.$$

Введение отрицательной обратной связи  $\Delta X_a$  не уменьшает.

Определим структурные схемы измерения компенсационного преобразования со статической характеристикой.

Рассмотрим функции преобразования отдельных блоков:

$$\Delta X = X - X_{oc}$$

$$X_{oc} = b * X_n \Rightarrow$$

$$X_n = K * X_n$$

Тогда  $X_n = \frac{K}{1+bK} X$  - функция преобразования всего устройства, где  $bK$  -петлевое усиление.

$$S = \frac{K}{1+bK} \text{ - коэффициент } S \text{ зависит только от } b \text{ и } K.$$

При этом, в конце цепи возникают два вида погрешностей:

1.  $\Delta X_m$

$$\begin{array}{r} b_1 + \Delta b_1 \\ b + \Delta b \leftarrow \dots \\ \Delta X_m \leftarrow S + \Delta S \leftarrow \begin{array}{r} b_n + \Delta b_n \\ K_1 + \Delta K_1 \\ K + \Delta K \leftarrow \dots \\ K_n + \Delta K_n \end{array} \end{array}$$

$$S = \frac{\Delta K(1+bK) - \Delta K K b - \Delta b K^2}{(1+bK)^2}$$

$$\frac{\Delta S}{S} = -\frac{1}{1+bK} \frac{\Delta K}{K} - \frac{Kb}{1+bK} \frac{\Delta b}{b}$$

Из выше приведенных выражений можно сделать выводы, что:

1. при больших  $Kb$ ,  $\frac{\Delta S}{S} \rightarrow \frac{\Delta b}{b}$ , т. е. нестабильность всего устройства определяется нестабильностью цепи обратной связи  $\Rightarrow$  введение отрицательной обратной связи  $\downarrow \Delta X_m$ .

2. При больших  $Kb$ , замкнутая система может потерять устойчивость (рис. 2.17), т. е. система будет реагировать не на сигнал, а на внутренние флуктуации.

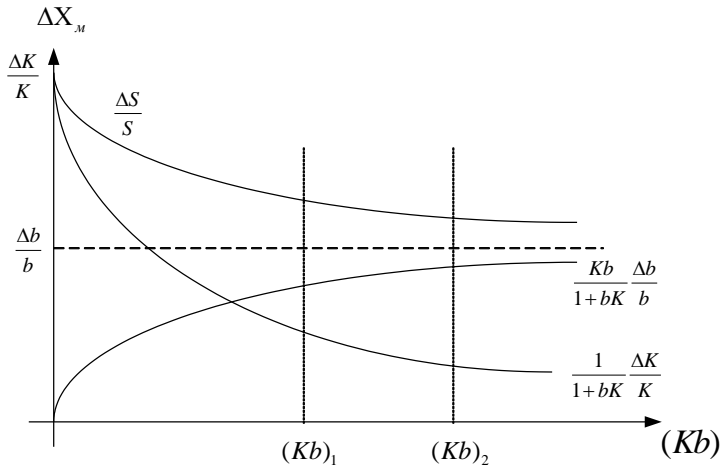


Рис. 2.17. Реакция замкнутой системы на внутренние флуктуации

Следовательно, компромисс между точностью и устойчивостью может быть найден при:

$$\frac{1}{1+bK} \frac{\Delta K}{K} = 3 \cdot \frac{bK}{bK} \frac{\Delta b}{\Delta b}$$

2.  $\Delta X_a \leftarrow$  внешние помехи, внутренние дрейфы  $\rightarrow X_{\Pi}$

$$\Delta X_a = \left( \frac{X_{\Pi 1}}{K_1} + \frac{X_{\Pi 2}}{K_1 K_2} + \dots + \frac{X_{\Pi n}}{K_1 K_2 \dots K_n} \right) - (X_{\text{Посм}} + b_2 b_3 \dots b_n X_{\text{Посм}} + b_3 b_4 \dots b_n X_{\text{Посм}} + \dots)$$

Введение отрицательной обратной связи не уменьшает аддитивную погрешность.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Метрология и радиоизмерения [Текст]: учебник для вузов / В. И. Нефедов, А. С. Сигов, В. К. Битюков и др.; под ред. В. И. Нефедова. – 2-е изд., перераб. – М.: Высш. шк., 2006. – 526 с.
2. Основы метрологии, стандартизации и сертификации [Текст]: учеб. пособие / М. Я. Марусина, В. Л. Ткалич, Е. А. Воронцов, Н. Д. Скалецкая. – СПб.: СПбГУ ИТМО, 2009. – 164 с.
3. Хамханова, Д. Общая теория измерений [Текст]: учеб. пособие / Д. Хамханова. – Улан-Удэ: Изд-во ВСГТУ, 2006. – 168 с.
4. Лифиц, И. М. Стандартизация, метрология и сертификация [Текст]: учебник / И. М. Лифиц. – 5-е изд., перераб. и доп. – М.: Юрайт-Издат, 2005. – 345 с.
5. Кошечая, И. П. Метрология, стандартизация и сертификация [Текст]: учебник / И. П. Кошечая, А. А. Канке. – М.: ФОРУМ: ИНФРА-М, 2009. – 416 с.
6. Никифоров, А. Д. Метрология, стандартизация и сертификация [Текст] / А. Д. Никифоров, Т. А. Бакиев. – М.: Высшая школа, 2005. – 422 с.
7. Герасимова, Е. Б. Метрология, стандартизация и сертификация [Текст]: учеб. пособие / Е. Б. Герасимова, Б. И. Герасимов. – М.: ФОРУМ: ИНФРА-М, 2008. – 224 с.
8. Дубовой, Н. Д. Основы метрологии, стандартизации и сертификации [Текст] / Н. Д. Дубовой, Е. М. Портнов. – М.: ИНФРА-М, 2008. – 256 с.
9. Метрология, стандартизация и сертификация [Текст] / А. И. Аристов, Л. И. Карпов, В. М. Приходько и др. – М.: Академия, 2008. – 383 с.
10. Сергеев, А. Г. Сертификация [Текст] / А. Г. Сергеев. – М.: Логос, 2008. – 349 с.
11. Правиков, Ю. М. Метрологическое обеспечение производства [Текст] / Ю. М. Правиков, Г. Р. Муслина. – М.: КноРус, 2009. – 240 с.



12. Никифоров, А. Д. Взаимозаменяемость, стандартизация и технические измерения [Текст] / А. Д. Никифоров. – М.: Высшая школа, 2000. – 224 с.

13. Тартаковский, Д. Ф. Метрология, стандартизация и технические средства измерений [Текст]: учебник для вузов / Д. Ф. Тартаковский, В. С. Ястребов. – М.: Высшая школа, 2002. – 205 с.

14. Якушев, А. И. Взаимозаменяемость, стандартизация и технические измерения [Текст]: учебник для вузов / А. И. Якушев, Л. Н. Воронцов, Н. М. Федотов. – М.: Машиностроение, 1986. – 352 с.

15. Нуждин, А. С. Измерения в холодильной технике: справочное руководство [Текст] / А. С. Нуждин, В. С. Ужанский. – М.: Агропромиздат, 1986. – 386 с.

16. Радкевич, Я. М. Метрология, стандартизация и сертификация [Текст]: учебник для вузов / Я. М. Радкевич, А. Г. Схиртладзе, Б. И. Лактионов. – М.: Высшая школа, 2004. – 767 с.

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	3
1. ПРЕДМЕТ МЕТРОЛОГИИ .....	4
1.1. Физические величины .....	5
1.2. Международная система единиц.....	9
1.3. Измерения и средства измерений. Основное уравнение метрологии .....	14
1.4. Основные характеристики измерений.....	15
1.5. Шкалы измерений.....	18
1.5.1. Типы отсчетных устройств .....	19
1.6. Классификация измерений .....	20
1.7. Основные методы измерений .....	26
1.8. Средства измерений .....	28
1.8.1. Классификация средств измерения.....	28
1.9. Основные показатели измерительных приборов.....	34
1.9.1. Статические характеристики .....	36
1.9.2. Динамические характеристики.....	37
1.10. Эталоны единиц электрических величин .....	40
1.11. Понятия счета, испытания, контроля и поверки.....	44
2. ПОГРЕШНОСТЬ ИЗМЕРЕНИЙ. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ .....	48
2.1. Классификация погрешностей измерений .....	48
2.1.1. Систематическая погрешность.....	53
2.1.2. Случайная погрешность .....	57
2.2. Правила и формы представления результатов измерений .....	69
2.3. Метрологические характеристики средств измерения ..	71

2.3.1. Пределы допускаемой основной погрешности средства измерения.....	74
2.3.2. Виды метрологических характеристик средств измерения .....	77
2.3.2. Нормирование метрологических характеристик .....	86
2.4. Структурные схемы измерения .....	88
2.4.1. Структурные схемы измерения компенсационного преобразования с астатической характеристикой .....	90
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	95
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК .....	96

Учебное издание

Поздышева Оксана Валентиновна

МЕТРОЛОГИЯ И СТАНДАРТИЗАЦИЯ  
В СПЦС

В авторской редакции

Подписано к изданию 27.08.2015.

Объем данных 1,49 Мб

ФГБОУ ВПО «Воронежский государственный  
технический университет»  
394026 Воронеж, Московский просп., 14